

Tommi Valve

Julkisen ulkovalaistuksen saneeraus LEDeillä – ”Helsinki LED” -hankkeen kannattavuustutkimus

Sähkötekniikan korkeakoulu

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi
diplomi-insinöörin tutkintoa varten Espoossa 18.1.2015.

Työn valvoja:

Prof. Liisa Halonen

Työn ohjaaja:

DI Teemu Pohjola



Aalto-yliopisto
Sähkötekniikan
korkeakoulu

Tekijä: Tommi Valve		
Työn nimi: Julkisen ulkovalaistuksen saneeraus LEDeillä – ”Helsinki LED” -hankkeen kannattavuustutkimus		
Päivämäärä: 18.1.2015	Kieli: Suomi	Sivumäärä: 9+57
Sähkötekniikan ja automaation laitos		
Professori: Valaistustekniikka		Koodi: S-118
Valvoja: Prof. Liisa Halonen		
Ohjaaja: DI Teemu Pohjola		
<p>Helsingin kaupunginhallitus perusti vuoden 2014 talousarvioneuvotteluissaan ”Helsinki LED” -hankkeen, jossa ehdotetaan julkisen ulkovalaistuksen noin 83 400 purkauslamppuvalaisimen korvaamista LED-valaistusratkaisuilla vuoden 2016 loppuun mennessä. Hankkeella tavoitellaan kaupungin juoksevien kulujen vähentämistä, energiasäästöjä sekä kaupunkitilan viihtyvyyden parantamista.</p> <p>Tässä diplomityössä tarkastellaan, onko julkisen ulkovalaistuksen saneeraus LEDeillä tällä hetkellä kokonaistaloudellisesti kannattavaa. Yhtenä työn tavoitteista on selvittää ”Helsinki LED” -hankkeelle mahdollisimman tarkka kustannusarvio ja takaisinmaksuaika. Tavoitteena on pohtia myös vaihtoehtoisia saneerausohjelmia ja vertailla, ovatko ne nettonykyarvoiltaan, takaisinmaksuajoiltaan ja aikatauluiltaan kannattavampia.</p> <p>Elinkaarikustannuslaskelmien mukaan on uudisrakentaminen ja elinkaarensa päässä olevan julkisen ulkovalaistuksen saneeraus LED-valaisimilla kannattavaa kokooja- ja tonttikaduilla sekä kevyen liikenteen väylillä, aukioilla ja puistoissa. Pääkaduilla ovat suurpainenatriumlamppuvalaisimet yhä kustannustehokkaimpia, mutta tämän odotetaan muuttuvan tulevaisuudessa LEDien kehityksen jatkuessa.</p> <p>Kannattavuuslaskennassa ratkaistiin ”Helsinki LED” -hankkeen investointikustannuksiksi noin 101,4 milj. euroa, vuosittaisiksi hoitokustannussäästöiksi noin 3,2 milj. euroa ja energiasäästöiksi noin 27,7 GWh. Lisäksi havaittiin, ettei hankkeen toteuttaminen ole taloudellisesti kannattavaa yli 30 vuoden takaisinmaksuajan sekä lyhyen aikajänteen vuoksi. Jos LEDeillä halutaan kuitenkin vaikuttaa esimerkiksi kaupungin imagoon tai energiatehokkuuteen, suositellaan kustannuksiltaan ja aikataulultaan suotuisampaa vaihtoehtoista saneerausohjelmaa I.</p>		
Avainsanat: Helsinki, LED, ulkovalaistus, saneeraus, taloudellinen kannattavuus, elinkaarikustannukset, energiatehokkuus		

Author: Tommi Valve		
Title: Renewing the Public Outdoor Lighting with LEDs – Feasibility Study of the "Helsinki LED" Project		
Date: 18.1.2015	Language: Finnish	Number of pages: 9+57
Department of Electrical Engineering and Automation		
Professorship: Illumination Engineering		Code: S-118
Supervisor: Prof. Liisa Halonen		
Advisor: M.Sc. (Tech.) Teemu Pohjola		
<p>The "Helsinki LED" project was established by the City Board of Helsinki at its 2014 budget session. The project proposes renewing the public outdoor lighting's approximately 83 400 discharge lamp luminaires with LED lighting solutions by the end of 2016. As a result, it aims at reducing the city's running costs, saving energy and enhancing the amenity of urban space.</p> <p>This thesis examines the current economic feasibility of renewing the public outdoor lighting with LEDs. One of the objectives of the study is to determine an accurate cost estimate and payback period for the "Helsinki LED" project. Moreover, the aim is to consider alternative renewal programs as well as compare the feasibilities of their net present values, payback periods and schedules.</p> <p>Based on the life-cycle costing, renewing the end-of-life public outdoor lighting with LED luminaires is feasible in collector streets, residential streets as well as pedestrian and bicycle ways, squares and parks. For main streets, high-pressure sodium lamp luminaires are still the most cost-effective solution, but this is expected to change in the future due to continuous development of LEDs.</p> <p>The profitability calculations of the "Helsinki LED" project indicated an approximated investment costs of 101,4 million euros, along with an annual operating cost savings of 3,2 million euros and energy savings of 27,7 GWh. However, the implementation of the project is not economically feasible due to a payback period of over 30 years and a brief time span. Nevertheless, if LEDs are to be used for example in improving the city's image or energy efficiency, the recommended solution is the alternative renewal program I. This program is more feasible based on both the costs and schedule.</p>		
Keywords: Helsinki, LED, outdoor lighting, renewal, economic feasibility, life-cycle costs, energy efficiency		

Esipuhe

Tämän diplomityön aihe muodostui Helsingin kaupunginhallitukselle tehdyn ”Helsinki LED” -hankkeen selvityksen ohessa. Työn tulokset pohjautuvat osittain kyseisen selvityksen sisältöön, josta vastaavat allekirjoittaneen lisäksi Juhani Sandström Helsingin kaupungin rakennusvirastosta, Olli Markkanen, Aki-Pekka Tammilehto, Teemu Pohjola ja Teemu Rinne Helsingin Energiasta sekä Antti Tiensuu ja Aleksanteri Ekrias LiCon-AT Oy:stä.

Työn aihe on hyvin ajankohtainen, sillä valaistuksen saralla on parhaillaan tapahtumassa merkittäviä muutoksia Euroopan unionin vihreän ja energiatehokkaan ajattelun sekä alati kehittyvän LED-tekniikan myötä. Työn elinkaarikustannus- ja kannattavuuslaskelmissa tehtiin joitakin oletuksia esimerkiksi katupoikkileikkauksista, saneerattavista valaisimista sekä LEDeistä. Lisäksi jatkuvasti kehittyvät valaistusmarkkinat ja Helsingin kaupungin julkinen ulkovalaistusverkko aiheuttivat omat haasteensa.

Kiitän professori Liisa Halosta ja Teemu Pohjolaa mainiosta ohjauksesta ja rakentavasta palautteesta, sekä Olli Markkasta erittäin mielenkiintoisesta aiheesta. Suuret kiitokset myös Aleksanteri Ekriakselle elinkaarikustannuslaskentaan liittyvästä opastuksesta, Jukka Kasalle Trimble NIS -verkkotietojärjestelmään liittyvistä neuvoista, sekä Timo Karjalaiselle ja Jari Kivelle kustannustiedoista. Lisäksi kiitokset kaikille muille, jotka ovat edistäneet tämän työn valmistumista.

Lopuksi haluan vielä kiittää Helsingin Energian HelenUlkovalaistuksen henkilöstöä, jotka ovat tutustuttaneet minut valaistuksen kiinnostavaan maailmaan, ja joiden kanssa on ollut ilo työskennellä yli neljän kesän ajan. Erityiskiitokset myös Marianalle, perheelleni ja opiskelutovereilleni, jotka ovat hienosti jaksaneet tukea minua opiskeluni ja työni aikana.

Espoo, 10.12.2014

Tommi Valve

Sisältö

Tiivistelmä	ii
Tiivistelmä (englanniksi)	iii
Esipuhe	iv
Sisältö	v
Symbolit, lyhenteet ja käsitteet	vii
1 Johdanto	1
2 Teoreettinen tausta	2
2.1 Valaistuksen energiatehokkuus ja energiapolitiikka	2
2.1.1 Direktiivit ja asetukset Euroopassa	2
2.1.2 LED-saneerauksia Euroopassa ja muualla	3
2.2 Valontuotto ja valonlähteet	4
2.2.1 Elohopealamput	5
2.2.2 Induktiolamput	6
2.2.3 Monimetallilamput	6
2.2.4 Suurpainenaatriumlamput	7
2.2.5 LEDit	8
2.2.6 Vertailu	9
2.3 Helsingin kaupungin julkinen ulkovalaistus	10
2.3.1 Helsingin kaupungin rakennusvirasto ja Helsingin Energia . . .	11
2.3.2 Yleisperiaatteet ja vaatimukset	12
2.3.3 Helsingin kaupungin ulkovalaistuksen tarveselvitys	13
3 Tutkimusaineisto ja -menetelmät	15
3.1 Helsingin kaupungin julkinen ulkovalaistusverkko	15
3.1.1 Nykytila	15
3.1.2 Energiatehokkuus	17
3.2 Elinkaarikustannuslaskenta	18
3.2.1 Valaistusratkaisut ja katupoikkileikkaukset	18
3.2.2 Rakennuskustannukset	20
3.2.3 Hoitokustannukset	21
3.2.4 Elinkaarikustannukset	24
3.2.5 Parametrit	24
3.3 Kannattavuuslaskenta	25
3.3.1 ”Helsinki LED” -hanke ja vaihtoehtoiset saneerausohjelmat . .	25
3.3.2 Kustannukset ja säästöt	28
3.3.3 Nettonykyarvo ja sisäinen korkokanta	28
3.3.4 Takaisinmaksuaika	29
3.3.5 Parametrit	29

4 Tulokset	31
4.1 Elinkaarikustannuslaskelmat	31
4.1.1 Pääkadut	31
4.1.2 Kokoojakadut	32
4.1.3 Tonttikadut	33
4.1.4 Kevyen liikenteen väylät, aukiot ja puistot	34
4.2 Kannattavuuslaskelmat	35
4.2.1 ”Helsinki LED” -hanke	35
4.2.2 Vaihtoehtoinen saneerausohjelma I	36
4.2.3 Vaihtoehtoinen saneerausohjelma II	37
4.3 Herkkyysanalyysi	38
5 Tarkastelu	39
5.1 Johtopäätökset	39
5.2 Yhteenveto ja suositukset	40
Viitteet	42
A Helsingin kaupungin julkinen ulkovalaistus	46
B Elinkaarikustannuslaskelmat	50
C Kannattavuuslaskelmat	54

Symbolit, lyhenteet ja käsitteet

Symbolit

C	Kiinteät kustannukset [€/valaisinpylväs]
E_k	Elinkaarikustannusten nykyarvo [€/tiometri]
$E_{k, LED}$	LED-valaisimien elinkaarikustannusten nykyarvo [€/tiometri]
H_e	Sähkön kokonaishinta [€/kWh]
H_l	Lampun ryhmävaihdon perushinta sisältäen asennustyön [€/kpl]
$H_{l, LED}$	LED-valaisimen tai moduulin ja liitäntälaitteen ryhmävaihdon perushinta sisältäen asennustyön sekä valaisimen eliniän aikaiset puhdistuskustannukset [€/kpl]
H_{ly}	Lampun yksittäisvaihdon perushinta sisältäen asennustyön [€/kpl]
$H_{ly, LED}$	LED-valaisimen, moduulin tai liitäntälaitteen yksittäisvaihdon perushinta sisältäen asennustyön [€/kpl]
H_p	Valaisinpylvään ja jalustan hinta sisältäen asennustyön sekä ympäristäytön [€/kpl]
H_{sv}	Sähköverkon perushinta [€/m]
H_v	Valaisimen hinta sisältäen ensimmäisen valonlähteen ja asennustyön [€/kpl]
J	Jäännösarvo [€/tiometri]
K_0	Investointikustannukset [€]
K_e	Energiakustannusten nykyarvo [€/tiometri]
$K_{e, LED}$	LED-valaisimien energiakustannusten nykyarvo [€/tiometri]
K_{e1}	Ensimmäisen vuoden energiakustannukset [€/tiometri]
$K_{e1, LED}$	LED-valaisimien ensimmäisen vuoden energiakustannukset [€/tiometri]
K_h	Hoitokustannusten nykyarvo [€/tiometri]
$K_{h, LED}$	LED-valaisimien hoitokustannusten nykyarvo [€/tiometri]
K_{h1}	Ensimmäisen vuoden hoitokustannukset [€/tiometri]
$K_{h1, LED}$	LED-valaisimien ensimmäisen vuoden hoitokustannukset [€/tiometri]
K_{kp}	Kunnossapitokustannusten nykyarvo [€/tiometri]
$K_{kp, LED}$	LED-valaisimien kunnossapitokustannusten nykyarvo [€/tiometri]
K_{kp1}	Ensimmäisen vuoden kunnossapitokustannukset [€/tiometri]
$K_{kp1, LED}$	LED-valaisimien ensimmäisen vuoden kunnossapitokustannukset [€/tiometri]
K_{rU}	Uudisrakentamisen rakennuskustannukset [€/tiometri]
K_{rV}	Valaisimien vaihdon rakennuskustannukset [€/tiometri]
N	Tarkasteluajanjakson pituus [a]
N_d	Diskontattu takaisinmaksuaika [a]
P_i	Valaisimen teho liitäntälaitteeseen [kW/kpl]
S	Valaisinpylväsväli [m]
S_{CO_2}	Ensimmäisen vuoden hiilidioksidipäästösäästöt [t]
S_e	Ensimmäisen vuoden energiasäästöt [GWh]

S_{e1}	Ensimmäisen vuoden energiakustannussäästöt [€]
S_{h1}	Ensimmäisen vuoden hoitokustannussäästöt [€]
S_{kp1}	Ensimmäisen vuoden kunnossapitokustannussäästöt [€]
k_e	Energiakustannusten diskonttauskerroin [-]
k_{kp}	Kunnossapitokustannusten diskonttauskerroin [-]
k_v	Vakiovalovirtaohjauskerroin [-]
k_y	Yleiskustannuskerroin [-]
m	Valaisinpylväiden lukumäärä poikkileikkauksessa [kpl]
n	Valaisimien lukumäärä poikkileikkauksessa [kpl]
p	Hallinnollisesti määrätty laskentakorko [-]
q	Yksittäisvaihtojen suhteellinen määrä vuosittain [-]
t	Tarkasteluvuosi [a]
t_1	Vuotuinen polttoaika [h]
t_2	Lampun hyötypolttoikä [a]
$t_{2, LED}$	LED-valaistusratkaisun tarkasteluaianjakson pituus [a]
β_e	Energiakustannusten vuotuinen kasvu [-]
β_{kp}	Kunnossapitokustannusten vuotuinen kasvu [-]

Lyhenteet

Ecodesign	Ekologinen tuotesuunnittelu
ELY	Elinkeino-, liikenne- ja ympäristökeskus
IRR	Sisäinen korkokanta (engl. Internal Rate of Return)
LED	Loistediodi (engl. Light-Emitting Diode)
MM	Monimetallilamppuvalaisin
NPV	Nettonykyarvo (engl. Net Present Value)
RoHS	Haitallisten aineiden käytön rajoittaminen (engl. Restriction of Hazardous Substances)
SpNa	Suurpainenatriumlamppuvalaisin
Trimble NIS	Helsingin Energian käyttämä verkkotietojärjestelmä
Wh	Wattitunti

Käsitteet

Diskonttaus	Prosessi, jolla selvitetään tulevan rahavirran nykyarvo
Elinkaarikustannukset	Valaistuksen elinkaaren aikaiset rakennuskustannukset, hoitokustannukset ja jäännösarvot
ESCO	Palveluliiketoiminta (engl. Energy Service Company), jossa investointikustannukset katetaan toteutuneilla energiasäästöillä
Hoitokustannukset	Valaistuksen käytönaikaiset energiakustannukset ja kunnossapitokustannukset
Hyötypolttoikä	Purkauslampputen ryhmvaihtoaika, jolloin valovirta on pudonnut 80 %:iin alkuperäisestä arvostaan
Jäännösarvo	Valaistuksen purkamis- ja kierrätyskustannukset sen elinkaaren päättyessä
Kokoojakatu	Palvelee kaupungin osa-alueen sisäistä liikennettä sekä alueen yhteyksiä pää- ja tonttikatuverkkoihin, missä nopeusrajoitus on tavallisesti 40–50 km/h
Nettonykyarvo	Taloudellinen hyöty tai tappio, joka muodostuu kaikkien tulo- ja menokassavirtojen nykyhetkeen diskonttaamisesta
Pääkatu	Palvelee seudullista ja kaupungin osa-alueiden välistä liikennettä, missä nopeusrajoitus on tavallisesti 50–70 km/h
Saneeraus	Valaistuksen uudisrakentaminen tai osittainen uusiminen esimerkiksi valaisimien vaihdoilla
Sisäinen korkokanta	Korko, jolla tulo- ja menokassavirtojen nykyarvot ovat samansuuruiset eli nettonykyarvo on nolla
Takaisinmaksuaika	Aika, jolloin kumulatiiviset tulokassavirratt kattavat investointikustannukset
Tonttikatu	Palvelee katujen varressa olevien tonttien liikennettä, missä nopeusrajoitus on tavallisesti 30–40 km/h
Valaistuslaitteet	Kiinteät rakenteet, kuten valaisimet, lamput, pylväät, valaisinvarret, sähkönjakolaitteet sekä johdot
Valotehokkuus	Ilmoittaa valonlähteen valovirran käytettyä sähkötehoa kohden [lm/W]
Valovirta	Ilmoittaa valonlähteen säteilemän näkyvän valon määrän luumeneina [lm]
Väriämpötila	Ilmoittaa mustan kappaleen absoluuttisen lämpötilan kelvineinä, jonka säteilemä valo vastaa tarkasteltavan tarkasteltavan kohteen valoa [K]
Värintoistoindeksi	Ilmoittaa valonlähteen säteilemän valon kyvyn [0–100] toistaa pintojen värejä verrattuna vertailuvalonlähteeseen

1 Johdanto

Helsingin kaupunginhallitus [1] perusti vuoden 2014 talousarvioneuvotteluissaan ”Helsinki LED” -hankkeen, jossa ehdotetaan kaikkien julkisten tilojen valaisimien korvaamista energiatehokkailla LED-valaistusratkaisuilla vuoden 2016 loppuun mennessä. Tällä tavoitellaan kaupungin juoksevien kulujen vähentämistä, energiasäästöjä sekä kaupunkitilan viihtyvyyden parantamista [1]. Hanke koskettaa myös kaupungin julkisen ulkovalaistuksen noin 83 400 purkauslamppuvalaisinta, joista Helsingin Energia valmisteli suosituksensa kaupunginhallitukselle vuoden 2014 syksyllä.

Tutkimusaihe on erittäin ajankohtainen, sillä esimerkiksi New Yorkissa, Los Angelesissa, Milanossa ja Vilnassa on jo siirrytty tai päätetty siirtyä lähes kokonaan LED-ulkovalaistukseen [2, 3, 4, 5]. Tähän ovat vaikuttaneet muun muassa LED-valaisimien viimeaikainen tuotekehitys, hintojen lasku ja valotehokkuuden parantuminen [6]. Helsingin kaupungin julkisessa ulkovalaistuksessa LEDien osuus on vielä marginaalinen, noin 1,1 %. Perinteisiä elohopealamppuvalaisimia on viime vuosina kuitenkin saneerattu myös energiatehokkaammilla LED-ratkaisuilla, sillä Euroopan unionin alueella elohopealamput poistuvat markkinoilta 13.4.2015 [7]. Tämän jälkeen jälleenmyyjät voivat vielä myydä varastonsa loppuun, mutta uusia lamppeja ei enää markkinoille saateta. Markkinoilta poistumisen taustalla ovat Euroopan unionin ympäristölliset ja energiatehokkuudelliset tavoitteet, joita ohjaavat Ecodesign-direktiivi 2009/125/EY sekä sitä toimeenpanevat asetukset 245/2009 ja 347/2010 [8, 9, 10].

Tämä diplomityö keskittyy tarkastelemaan, onko julkisen ulkovalaistuksen saneeraus LEDeillä tällä hetkellä kokonaistaloudellisesti kannattavaa. Yhtenä työn tavoitteista on selvittää ”Helsinki LED” -hankkeelle mahdollisimman tarkka kustannusarvio ja takaisinmaksuaika. Tavoitteena on pohtia myös vaihtoehtoisia saneerausohjelmia ja vertailla, ovatko ne nettonykyarvoiltaan, takaisinmaksuajoiltaan ja aikatauluiltaan kannattavampia. Lisäksi tarkoituksena on tutkia Helsingin kaupungin julkisen ulkovalaistuksen nykytilaa ja energiatehokkuutta, sekä lyhyesti muutamien muiden kaupunkien LED-saneeraushankkeita. Työ tukee Helsingin Energian kaupunginhallitukselle laatimaa selvitystä.

Työn toisessa luvussa kerrotaan enemmän valaistuksen energiatehokkuudesta ja -politiikasta, jotka ovat ”Helsinki LED” -hankkeen ja elohopealamppujen markkinoilta poistumisen takana. Esitellään myös ulkovalaistuksen tyypillisimmät valonlähteet, ja tutustutaan syvemmin Helsingin kaupungin julkiseen ulkovalaistukseen sekä muutamien muiden kaupunkien LED-saneeraushankkeisiin. Kolmannessa luvussa selostetaan työn tutkimusaineisto ja -menetelmät, joilla voidaan suorittaa tarvittavat elinkaarikustannus- ja kannattavuuslaskelmat. Lisäksi perehdytään Helsingin julkisen ulkovalaistusverkon nykytilaan ja energiatehokkuuteen. Neljännessä luvussa esitetään työn tulokset: ensiksi katupoikkileikkauksittain ja sitten saneerausohjelmittain. Suoritetaan myös herkkyyksianalyysi. Lopuksi tarkastellaan vielä työn tutkimustulosten merkittävyyttä ja luotettavuutta, sekä esitetään yhteenvedo ja suositukset.

2 Teoreettinen tausta

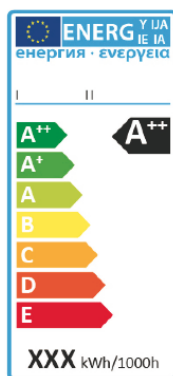
Tässä luvussa esitetään oleellinen teoreettinen taustatieto tämän työn ja aikaisemman tutkimuksen ymmärtämiseksi. Ensiksi kerrotaan valaistuksen energiatehokkuudesta ja -politiikasta, jotka ovat ”Helsinki LED” -hankkeen ja elohopealamppujen markkinoilta poistumisen takana. Tarkastellaan lyhyesti myös muutamien pohjoisamerikkalaisten ja eurooppalaisten kaupunkien LED-saneeraushankkeita. Seuraavaksi esitellään ulkovalaistuksen tyypillisimmät valonlähteet, ja vertaillaan niitä keskenään. Lopuksi tutustutaan vielä Helsingin kaupungin julkiseen ulkovalaistukseen.

2.1 Valaistuksen energiatehokkuus ja energiapolitiikka

Maaailman energiankulutus kasvaa jatkuvasti [11], vaikka sitä yritetään vähentää erilaisilla energiapoliittisilla säädöksillä, suosituksilla sekä energiansäästö- ja tehokkuussopimuksilla. Valaistus vastaa noin 19 % maailman sähkönkulutuksesta ja aiheuttaa noin 7 % maailman hiilidioksidipäästöistä [11]. Näitä voidaan pienentää merkittävästi parantamalla valaistuksen energiatehokkuutta, jonka on todettu olevan yksi helpoimmista, kustannustehokkaimmista sekä ympäristöystävällisimmistä keinoista hiilidioksidipäästöjen vähentämiseksi [11]. Tämän vuoksi myös Euroopan unioni on asettanut valaistukselle useita vaatimuksia tukeakseen ympäristöllisiä ja energiatehokkuudellisia tavoitteitaan.

2.1.1 Direktiivit ja asetukset Euroopassa

Nykyisin Euroopan unionissa käytetään kuvassa 1 esitettyä direktiivin 2010/30/EU ja asetuksen 874/2012 mukaista energiamerkintää kuvaamaan valaistuksen energiatehokkuutta. Merkintä perustuu sähkölamppujen ja valaisimien sähköiseen hyötysuhteeseen sekä kertoo energiatehokkuuden asteikolla A++–E, jossa A++-luokka on tehokkain ja E-luokka kuluttavin vaihtoehto. Lisäksi siitä ilmenee lampun painotettu energiankulutus kilowattitunteina 1 000 tunnissa. [12] Perinteiset elohopealamput kuuluvat energiatehokkuusluokka-asteikon alimpiin luokkiin, kun taas ylempiin sijoittuvat esimerkiksi monimetalli- ja suurpainainenatriumlamput sekä LEDit. Havaitaan, ettei energiatehokkuutta tule yleistää ainoastaan LEDeihin.



Kuva 1: Lampun energiatehokkuuden kertova energiamerkintä [12].

Ecodesign-direktiivissä 2009/125/EY säädetään energiaan liittyvien tuotteiden ekologiselle suunnittelulle asetettavien vaatimusten perusteet. Direktiivillä tavoitellaan tuotteiden ympäristövaikutusten vähentämistä koko elinkaaren ajalta. Tärkeimpiä tavoitteita ovat myös luonnonvarojen käytön ja energiatehokkuuden parantaminen. Direktiivissä ei suoraan määritellä tuoteryhmäkohtaisia vaatimuksia, vaan sen nojalla annetaan yksittäisille tuoteryhmille Ecodesign-asetuksia, jotka ovat voimassa jokaisessa Euroopan unionin jäsenmaassa. Erityisesti palvelusektorin valaistustuotteiden ympäristövaikutusten vähentämiseksi säädettiin direktiiviä toimeenpaneva asetus 245/2009. Asetuksessa keskeisimmiksi ympäristönäkökohdiksi määritellään käytönaikainen energiankulutus ja lampujen elohopeapitoisuus. [8, 9]

Asetuksien 245/2009 ja 347/2010 mukaiset energiatehokkuus-, suorituskyky- ja tuotetietovaatimukset palvelusektorin valaistustuotteille otetaan käyttöön vaiheittain vuosina 2010–2017. Asetukset koskevat loiste- ja purkauslampuja sekä niiden virranrajoittimia ja valaisimia. Vaatimukset kohdistuvat pääosin tuotteiden valotehokkuuteen, valovirran alenemaan ja eloonjäämisasteeseen. Merkittävin käytännön vaikutus tapahtuu 13.4.2015, kun elohopealamput ja niitä suoraan korvaavat suurpainenatriumlamput poistuvat markkinoilta. Varsinaisesti asetuksissa ei kielletä niiden myyntiä, vaan niissä kielletään yleisesti tehottomien tuotteiden markkinoille saattaminen. Samanaikaisesti elohopealampuilta raukeaa RoHS-direktiivissä 2011/65/EU (engl. Restriction of Hazardous Substances) määritelty elohopean käyttöoikeus. Seuraava huomattava käytännön vaikutus havaitaan vuonna 2017, jolloin osa monimetallilampuista poistuu markkinoilta. [7, 9, 10]

Euroopan unionin palvelusektorin asetuksilla tavoitellaan 30–45 TWh:n vuosittaista energiasäästöä koko alueella vuosina 2030–2050 [13]. Pelkästään elohopealampujen poistumisen arvioidaan vähentävän katuvalaistuksen vuosittaista energiankulutusta noin 4 TWh:lla ja hiilidioksidipäästöjä noin 2 miljoonalla tonnilla vuoteen 2020 mennessä [14]. Huomataan, että energiatehokkaalla valaistuksella voidaan merkittävästi pienentää energiankulutusta ja päästöjen määrää. Lisäksi asetukset merkitsevät sitä, että esimerkiksi kaupunkien on uusittava elohopeavalaisimensa tehokkaammilla induktio-, monimetalli- ja suurpainenatriumlampuilla tai LEDeillä, joita tarkastellaan tarkemmin luvussa 2.2. Monet kaupungit, kuten New York, Los Angeles, Milano, Vilna ja Turku ovat viime vuosina havainneet, että valaistuksen energiatehokkuutta voidaan parhaiten kohentaa LED-ratkaisuilla, joilla usein saadaan myös merkittäviä hoitokustannussäästöjä.

2.1.2 LED-saneerauksia Euroopassa ja muualla

Yhdysvalloissa toteutetaan yksi maailman suurimmista LED-saneerausprojekteista, kun New Yorkin kaupungin kaikki 250 000 katuvalaisinta uusitaan LED-valaistusratkaisuilla vuoteen 2017 mennessä. Projektin on arvioitu kustantavan noin 76,5 miljoonaa dollaria, ja vuosittain on määrä saneerata noin 80 000 valaisinta. Arvioiden mukaan toimenpiteillä säästetään vuosittain noin 14 miljoonaa dollaria valaistuksen hoitokustannuksissa. [2, 15]

Yhdysvaltojen toiseksi suurimmassa kaupungissa Los Angelesissa saneerattiin noin 141 000 katuvalaisinta LED-valaistusratkaisuilla vuosina 2009–2013. Projektin kokonaiskustannukset olivat noin 57 miljoonaa dollaria. Los Angelesin kaupungin katuvalaistusviraston (engl. Bureau of Street Lighting) mukaan saneerauksilla saavutettiin yli 63 %:n energiasäästö sekä vähennettiin vuosittaisia hiilidioksidipäästöjä yli 47 500 tonnilla. Takaisinmaksuajaksi arvioitiin 7 vuotta, jonka jälkeen kaupungin odotetaan vuosittain säästävän noin 10 miljoonaa dollaria valaistuksen hoitokustannuksissa. [3]

Italian toiseksi suurimmassa kaupungissa Milanossa saneerataan noin 84 000 valaisinta LED-valaistusratkaisuilla vuosina 2014–2015. Kaupungissa järjestetään vuoden 2015 maailmannäyttely, johon on päätetty valmistautua myös uudella valaistusjärjestelmällä. Toimenpiteisiin ovat erityisesti vaikuttaneet energiatehokkuus, kestävä kehitys sekä maailmannäyttelyn pääteema: ”Feeding the Planet, Energy for Life”. [4]

Liettuassa saneerataan pääkaupunki Vilnan kaikki 44 000 katuvalaisinta energiatehokkaammilla LED-valaistusratkaisuilla vuosina 2014–2016. Valaistuksen energiankulutuksen arvioidaan vähenevän yli 70 % ja kaupungin saavan noin 2 miljoonan euron vuosittaiset energiakustannussäästöt. Lisäksi yleisen turvallisuuden odotetaan parantuvan ja ympäristösaasteiden vähentyvän, kun lähes elinkaarensa päässä oleva valaistus uusitaan. [5]

Turun kaupunkia pidetään yhtenä LED-katuvalaistuksen edelläkävijöistä Pohjois-Euroopassa. Kaupungin perinteisiä elohopealamppuvalaisimia on viime vuosina saneerattu LED-valaistusratkaisuilla, ja viimeisetkin noin 5 000 elohopealamppuvalaisinta uusitaan vuosina 2014–2015. Tämän jälkeen LEDien osuus kaupungin katuvalaistuksesta on lähes 30 %. Arvioiden mukaan saneerauksilla saavutetaan noin 70 %:n energiasäästö elohopealamppuvalaisimiin verrattuna. Turussa kaikki saneeraukset ovat toteutettu ESCO-hankkeina, joissa kustannukset katetaan toteutuneilla energiasäästöillä. [16]

2.2 Valontuotto ja valonlähteet

Keinovalonlähteet jaotellaan tavallisesti valontuotoltaan termiseen säteilyyn ja luminesenssisäteilyyn. Termisessä säteilyssä aineen osasten lämpöliike aikaansaa värähtelyä kaikilla aallonpituuksilla, ja sen spektri on jatkuva. Luminesenssisäteilyä tapahtuu vastaavasti vain tietyillä aallonpituuksilla tai spektrin osilla, mutta se on voimakkaampaa kuin aineen saman lämpötilan mukainen terminen säteily. Ulkova-
laistuksen tyypillisimmät valonlähteet perustuvat pääasiassa joko kaasujen luminesenssisäteilyyn eli purkaussäteilyyn (elohopea-, induktio-, monimetalli- ja suurpainenaatriumlamput) tai elektroluminesenssisäteilyyn (LEDit). [17]

2.2.1 Elohopealamput

Elohopealamppujen valontuotto perustuu suurpaineisessa elohopeahöyryssä tapahtuvaan kaasupurkaukseen. Sähkövirta aikaansaa kaasuaatomien virittymistä korkeammille energiatasojille, jonka jälkeen ne putoavat takaisin luonnollisille tasoilleen. Syntyvä sähkömagneettinen säteily on pääosin näkyvää valoa ja osin ultraviolettisäteilyä. Lamppujen väriominaisuuksia ja valotehokkuutta voidaan parantaa pinnoittamalla niiden ulkokupujen sisäpinnat loisteaineella, jolloin osa ultraviolettisäteilystä muuttuu näkyväksi valoksi. Elohopealamput tuottavat valkoista valoa, ja ne tarvitsevat kuristimen, mutteivät sytytinlaitteita. [17]

Yleisesti elohopealamppuja pidetään kaikkein yksinkertaisimpina, helppokäyttöisimpinä ja luotettavimpina purkauslamppuina [17], mutta nykyisin niiden käyttöä ei enää uudisrakentamisessa suositella Ecodesign-asetuksien sekä kokonaistaloudellisuuden vuoksi. Lamppujen hyötykäyttöikä on tavallisesti noin 12 000–16 000 tuntia ja valotehokkuus 40–55 lm/W [18]. Elohopealamppuja on perinteisesti käytetty esimerkiksi ulko- ja teollisuusvalaistuksessa sekä varastojen ja myymälöiden valaistuksessa [17]. Helsingissä niillä valaistaan pääasiassa kokooja- ja tonttikatuja sekä kevyen liikenteen väyliä, aukioita ja puistoja. Kuvassa 2 esitetään elohopealamppuvalaisimilla valaistu Ratavallintie.



Kuva 2: Elohopealamppuvalaisimilla valaistu Ratavallintie.

2.2.2 Induktiolamput

Induktiolamppujen valontuotto perustuu sähkömagneettiseen induktioon sekä pienpaineisessa elohopeahöyryssä tapahtuvaan kaasupurkaukseen. Suurtaajuinen sähkövirta aikaansaa induktiokelassa sähkömagneettisen kentän, joka ionisoi täytöskaasun. Syntyvä ultraviolettisäteily muutetaan näkyväksi valoksi lamppujen ulkokupujen sisäpintojen loisteaineilla. Induktiolamput tuottavat valkoista valoa, ja ne tarvitsevat toimiakseen ulkoisen suurtaajuusvirtalähteen. [17]

Induktiolamput ovat erittäin pitkäikäisiä, sillä ne eivät sisällä kulumia osia [17]. Tämän vuoksi niitä suositellaan käytettäväksi kohteissa, jotka ovat sijainniltaan ja valaistuksen huollon kannaltaan hankalia. Lamppujen hyötypolttoikä on tavallisesti yli 60 000 tuntia ja valotehokkuus 50–75 lm/W. Induktiolamput soveltuvat esimerkiksi ulko- ja teollisuusvalaistukseen sekä pysäköintialueiden valaistukseen. [19] Helsingissä niillä valaistaan pääasiassa kevyen liikenteen väyliä, aukioita ja puistoja. Kuvassa 3 esitetään induktiolamppuvalaisimilla valaistu Arabianaukio.



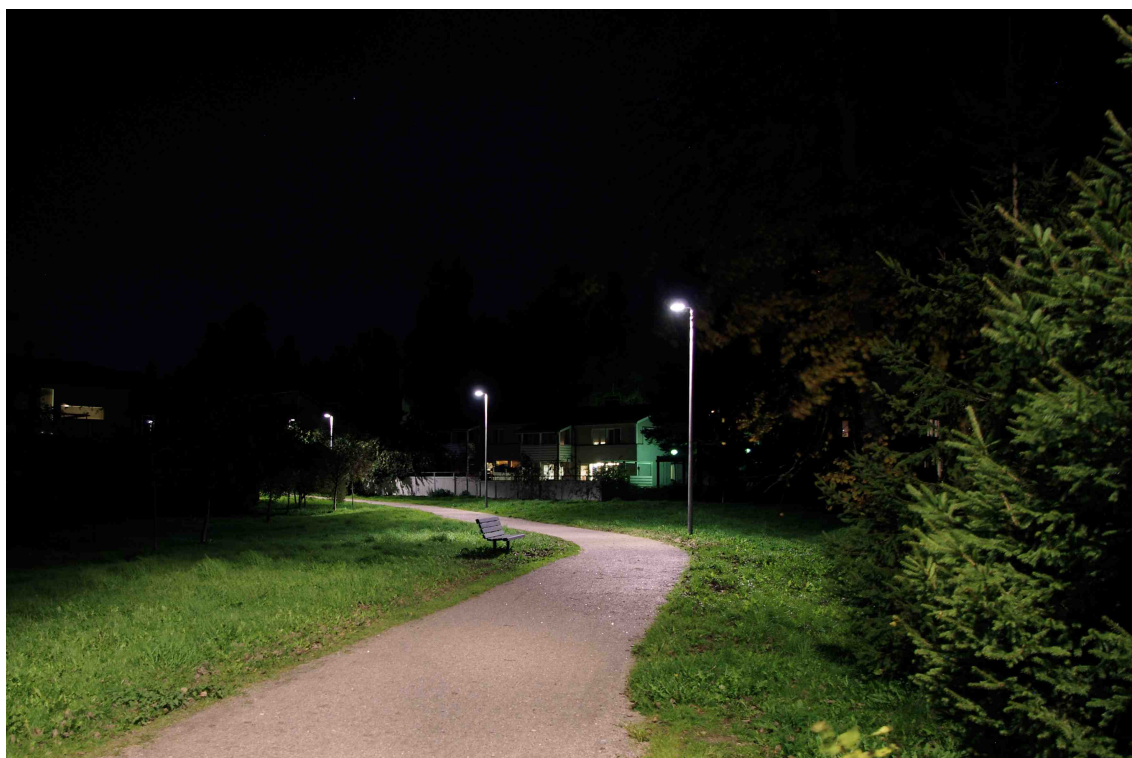
Kuva 3: Induktiolamppuvalaisimilla valaistu Arabianaukio.

2.2.3 Monimetallilamput

Monimetallilamput ovat kehitetty elohopealampuista, ja siksi niiden valontuottoperiaate on myös samankaltainen. Merkittävin ero tekniikassa on eri metallien halogeeniyhdisteiden hyödyntäminen suurpaineisessa kaasupurkauksessa. Kullakin metallilla on omanlaisensa säteilyominaisuudet, joilla voidaan parantaa lamppujen va-

lotehokkuutta ja väriominaisuuksia. Lisäksi metallihalidit vaikuttavat purkauksessa syntyvään ultraviolettisäteilyn määrään. Monimetallilamput tuottavat valkoista valoa, ja ne tarvitsevat sytyttimen sekä kuristimen. Lisäksi niiden polttoasento on useimmiten rajoitettu. [17]

Viime vuosina monimetallilamput ovat kehittyneet kaikkein monikäyttöisimmiksi purkauslamppuiksi. Niitä suositellaan käytettäväksi kohteissa, joissa vaaditaan hyvä värintoisto. Lamppujen hyötypolttoikä on tavallisesti 10 000–16 000 tuntia ja valotehokkuus 80–125 lm/W. Monimetallilamput soveltuvat esimerkiksi ulko-, julkisivu- ja teollisuusvalaistukseen sekä urheilutilojen ja myymälöiden valaistukseen. [19] Helsingissä niillä valaistaan pääasiassa tonttikatuja, kevyen liikenteen väyliä, aukioita ja puistoja. Kuvassa 4 esitetään monimetallilamppuvalaisimilla valaistu Tuikkupuisto.

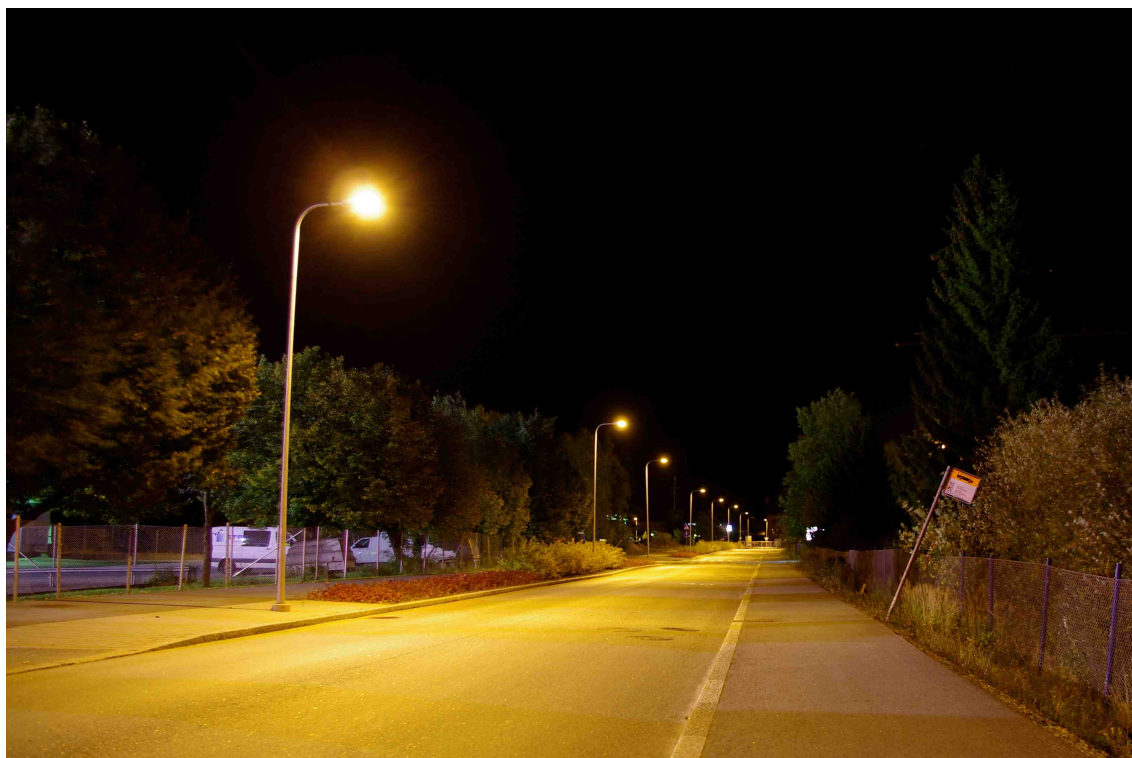


Kuva 4: Monimetallilamppuvalaisimilla valaistu Tuikkupuisto.

2.2.4 Suurpainenatriumlamput

Suurpainenatriumlamppujen valontuotto perustuu suurpaineisessa natriumhöyrystä tapahtuvaan kaasupurkaukseen. Sähkövirta aikaansaa kaasuaatomien virittymistä korkeammille energiatasolle, jonka jälkeen ne putoavat takaisin luonnollisille tasolle. Syntyvä sähkömagneettinen säteily on pääosin näkyvää valoa, eikä loisteaineita tarvita. Lamput tuottavat oranssinkeltaista valoa, ja ne tarvitsevat sytyttimen sekä kuristimen. Erityistapauksena korvaavat suurpainenatriumlamput, jotka soveltuvat suoraan käytettäväksi elohopealamppuvalaisimien liitäntälaitteiden kanssa. [17]

Nykyisin suurpainenatriumlamppuja pidetään kaikkein kustannustehokkaimpina purkauslamppuina [20]. Niitä suositellaan käytettäväksi kohteissa, joissa ei vaadita erityisen hyvää värintoistoa. Lamppujen hyötypolttoikä on tavallisesti 16 000–24 000 tuntia ja valotehokkuus 70–145 lm/W. Suurpainenatriumlamput soveltuvat esimerkiksi ulko- ja teollisuusvalaistukseen sekä varastojen ja kasvihuoneiden valaistukseen. [17, 19] Helsingissä niillä valaistetaan muun muassa pää-, kokooja- ja tonttikatuja sekä kevyen liikenteen väyliä ja puistoja. Kuvassa 5 esitetään suurpainenatriumlamppuvalaisimilla valaistu Lampputie.



Kuva 5: Suurpainenatriumlamppuvalaisimilla valaistu Lampputie.

2.2.5 LEDit

LED-valaistusratkaisujen valontuotto perustuu loistediodeihin (engl. Light-Emitting Diode), jotka ovat puolijohdekomponentteja. Valaisin tai lamppu alkaa säteillä valoa johtamalla sähkövirtaa diodin läpi, mitä kutsutaan elektroluminesenssiksi. Tavallisesti valaistusratkaisuissa käytetään useita diodeja, ja valon värin määrittelee pääasiassa käytettävä puolijohdemateriaali. LEDien lämmönhallinta on erittäin tärkeää, sillä puolijohdeliitoksen lämpeneminen pienentää valontuottoa ja lyhentää elinikää. Lopullisiin arvoihin vaikuttavat lämpötilan suuruus, valaistusratkaisun ohjausvirta ja jäähdytyslevyn ominaisuudet. [19]

Yhdysvaltain energiaministeriön (engl. Department of Energy) [6] mukaan LEDit kehittyvät jatkuvasti yhä paremmiksi, edullisemmiksi ja valotehokkaammiksi. Nykyään LED-valaistusratkaisuja voidaan soveltaa jo useimmissa valaistuskohdeissa, ja

niillä päästään samoihin valotehokkuuksiin kuin perinteisillä purkauslamppuvalaisimilla [21]. LED-valaisimien valotehokkuuden arvioidaan nousevan vuoteen 2020 mennessä jopa 200 lm/W:iin [6]. LEDit ovat myös erittäin pitkäikäisiä, sillä niiden hyötypolttoiksi arvioidaan yli 50 000 tuntia [19]. Helsingissä niillä valaistaan muun muassa kokooja- ja tonttikatuja sekä kevyen liikenteen väyliä, aukioita ja puistoja. Kuvassa 6 esitetään LED-valaisimilla valaistu Sysimiehentie.



Kuva 6: LED-valaisimilla valaistu Sysimiehentie.

2.2.6 Vertailu

Ulkovalaistuksen tyypillisimpiä valonlähteitä vertaillaan taulukossa 1. Huomataan, että elohopealampuilla on suuri energiankulutus, lyhyt hyötypolttoikä ja huono valotehokkuus. Ne voittavat muut valonlähteet ainoastaan yksikkö hinnassa, sekä osan monimetallilampuista hyötypolttoikässä ja suurpainenatriumlampuista värintoistossa. Lisäksi havaitaan, että induktiolamppujen ja LED-valaisimien hyötypolttoikä on merkittävästi pidempi, sekä monimetalli- ja suurpainenatriumlamppujen valotehokkuus korkeampi kuin muiden valonlähteiden. Todellisuudessa purkauslamppujen valotehokkuudet ovat kuitenkin ainakin 10–15 % pienemmät, kun huomioidaan valaisimien ja liitäntälaitteiden aiheuttamat häviöt [19].

Elohopea-, induktio- ja monimetallilamput sekä LEDit tuottavat valkoista valoa ja suurpainenatriumlamput oranssinkeltaista valoa. Useimmat induktio- ja monimetallilamput sekä LED-valaisimet omaavat hyvän värintoistokyvyn, kun taas elohopea-

ja suurpainenatriumlamppujen värintoisto on huonompaa. Värit toistuvat siis luonnollisempana valkoisessa valossa kuin keltaisessa. Motivan [22] mukaan väreillä voidaan myös vaikuttaa kohteiden näkyvyyteen sekä kuljettajien näkö- ja havainnointikykyihin. Esimerkiksi kohteiden havaitseminen ääreisnäön alueella paranee valkoisessa valossa ja alhaisilla valaistustasoilla. Toisaalta mitä monokromaattisempaa valoa käytetään, sitä parempia ovat kuljettajien näöntarkkuus ja havaitsemisnopeus keskeisnäön alueella.

Taulukko 1: Ulkovalaistuksen tyypillisimmät valonlähteet [6, 17, 18, 19].

	Elohopea-lamput	Induktio-lamput	Monimetalli-lamput	Suurpainenatriumlamput	LED-valaisimet
Yksikköhinta [-]	edullinen	korkea	korkea	kohtalainen	korkea
Hyötypolttoikä [h]	12 000–16 000	60 000	10 000–16 000	16 000–24 000	50 000
Tehoalue [W]	50–1 000	25–165	20–400	35–1 000	10–200
Valonsäätö [%]	-	-	50–100	50–100	0–100
Valotehokkuus [lm/W]	40–55	50–75	80–125	70–145	25–100
Väriämpötila [K]	3 400–4 000	3 000–4 100	2 700–5 600	1 800–2 500	2 700–6 500
Värintoistoindeksi [-]	40–60	80–90	80–95	20–60	60–95

Yleisesti purkauslamput eivät sovellu valonsäätöön erityisen hyvin, eivätkä elohopea- ja induktiolamput käytännössä ollenkaan. Monimetalli- ja suurpainenatriumlamppuja ei ole mahdollista himmentää alle 50 %:iin aiheuttamatta muutoksia hyötypolttoikässä ja valon värissä. LED-valaisimien valonsäätö on sen sijaan huomattavasti käytännöllisempää ja taloudellisempää. Ne voidaan esimerkiksi integroida älykkääseen valaistusverkkoon, jolloin valaisimia on mahdollista säätää ohjauslaitteiden avulla portaattomasti jopa 0–100 %:iin. [19]

Nykyään suurpainenatriumlamppuja pidetään vielä kustannustehokkaimpina tie- ja katuvalaistuksen valonlähteinä [20]. LEDien yleistymistä ovat hidastaneet muun muassa valaisimien korkea hinta, lämmönhallinta sekä käyttökokemusten ja standardisoinnin puute [21]. Myös monimetalli- ja suurpainenatriumlamput ovat viime vuosina kehittyneet entistä pitkäikäisemmiksi ja valotehokkaammiksi [22]. Tulevaisuudessa energiatehokkaampien LED-valaisimien odotetaan kuitenkin yleistyvän niiden tuote- ja hintakehityksen jatkuessa. Siten voidaan yhä vähentää valaistuksen energiankulutusta, hiilidioksidipäästöjä sekä hoitokustannuksia.

2.3 Helsingin kaupungin julkinen ulkovalaistus

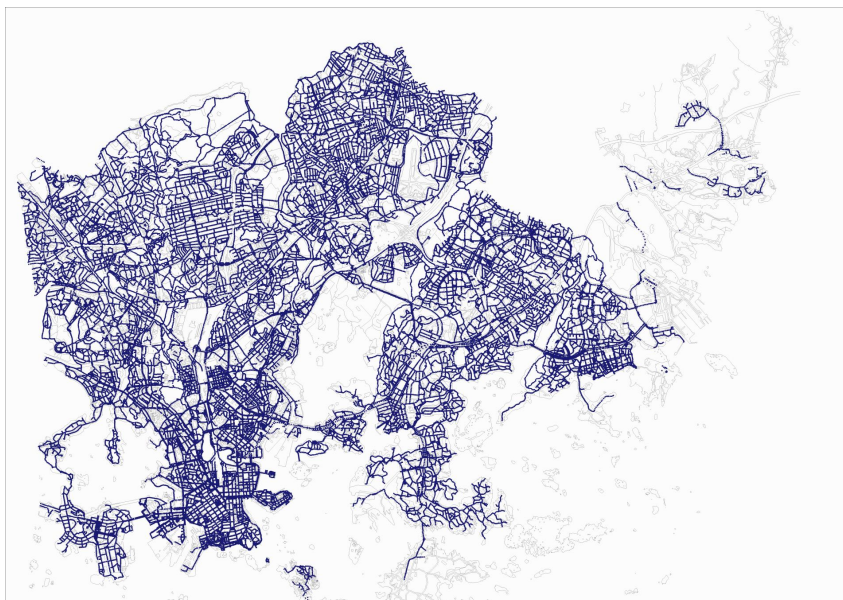
Helsinkiä on ohjeistetusti valaistu jo vuodesta 1818: ensiksi kaupunkilaisten omilla valolyhdyillä ja 1860-luvusta julkisella kaasukatuvalaistuksella. Sähkövaloja kehitettiin ensimmäistä kertaa katuvalaistuksessa vuonna 1885. Helsingin kaupungin

sähkölaitos perustettiin vuonna 1909, jonka myötä alkoi myös laajempi sähkövalaistuksen käyttö. Useimmat julkiset paikat olivat sähköisesti valaistuja ennen toista maailmansotaa, ja viimeisetkin kaasupalot poistettiin vuonna 1946. Sähkölaitos teki 1950-luvulla yleissuunnitelman koko kaupungin valaistuksesta, ja seuraavan 30 vuoden aikana valaisimien kokonaismäärä moninkertaistui. [23] Nykyään Helsingin julkinen ulkovalaistusverkko koostuu yli 84 000 valaisimesta ja yli 1 600 katuvalokeskuksesta.

2.3.1 Helsingin kaupungin rakennusvirasto ja Helsingin Energia

Helsingin kaupungin rakennusvirasto määrittelee Helsingin valaistuksen yleisen laadun, tavoitetason ja sisällön. Lisäksi sen tehtäviin kuuluvat valaistuksen tarveselvitysten ja keskeisten yleissuunnitelmien laadinta sekä tarvittavien valaistuspalveluiden hankinta. Helsingin kaupungin julkinen ulkovalaistus tilataan Helsingin Energialta sisäisenä elinkaaripalveluhankintana, jonka kiinteä hinta on viime vuosina ollut noin 20 miljoonaa euroa. Palveluun sisältyy ulkovalaistusjärjestelmän vuosittainen investointi, käyttö, ylläpito ja energia. [24]

Helsingin Energia vastaa kokonaispalveluna Helsingin kaupungin julkisen ulkovalaistuksen suunnittelusta, rakentamisesta, ylläpidosta ja taseesta. Helsingissä valaistetaan kulkuväylien, puistojen ja aukoiden ohella myös keskeisiä kaupunkikuvallisia rakennuksia, siltoja ja taideteoksia. Kaiken kaikkiaan kaupunkia valaisee yli 84 000 valaisinta, jotka esitetään kuvassa 7. Valaisimista noin 69,3 % on suurpainenatriumlamppuvalaisimia, 16,4 % elohopealamppuvalaisimia, 10,9 % monimetallilamppuvalaisimia, 1,1 % LED-valaisimia, 0,9 % induktiolamppuvalaisimia ja 1,4 % muita valaisimia. Ulkovalaistusjohtoja Helsingissä sijaitsee yhteensä noin 2 800 km, josta maakaapelia on noin 89 % ja ilmajohtoa noin 11 %.



Kuva 7: Helsingin kaupungin julkinen ulkovalaistusverkko (7/2014).

Rakennusviraston ja Helsingin Energian tärkeimpiä tavoitteita ovat laadukkaan, kustannustehokkaan sekä energiatehokkaan valaistuksen toteuttaminen kaupungin strategiaohjelman mukaisesti [24]. Julkisen ulkovalaistusverkon energiatehokkuusohjelmaa on toimeenpantu vuotuisen uudisrakentamisen ohella myös elohopealamppuvalaisimien saneerausohjelmassa, jossa uusitaan noin 46 000 valaisinta vuosina 2009–2018. Elohopealamppuvalaisimia on saneerattu energiatehokkaammilla suurpainenatriumlamppu-, monimetallilamppu- ja LED-valaisimilla kokonaistaloudellisten tarkastelujen mukaisesti. Arvioiden mukaan elohopealamppuvalaisimista on vuoden 2014 lopussa uusittu yli 75 %, ja LED-valaisimia on yli 1 500.

Helsingin Energia on viime aikoina seurannut yhä tarkemmin energiatehokkaiden valonlähteiden kehitystä. LED-valaisimien käytettävyyttä on esimerkiksi selvitetty erilaisilla tutkimushankkeilla, joista merkittävimpinä voidaan pitää Herttoniemen ja Munkkiniemenrannan testausalueita sekä Aalto-yliopiston ja VTT:n AthLEDics-tutkimusta. Lisäksi historiallisia Y-valaisimia on varustettu LED-valonlähteillä.

LEDien yleistymiseen on myös valmistauduttu uudella koko kaupungin kattavalla C2 SmartLight -ohjausjärjestelmällä, jonka palvelusopimus kattaa vuodet 2013–2028. Samalla uusittiin osittain tai kokonaan kaikki katuvalokeskukset, ja varustettiin ne energiamittareilla sekä uusilla ohjauslaitteilla. Ohjausjärjestelmän sopimuskaudella asennetaan myös noin 10 000 valaisinkohtaista ohjainta. Toimenpiteillä voidaan parantaa energiatehokkuutta entisestään, sillä valaisimien valaistusaikaa ja -tehoa on mahdollista säätää aluekohtaisesti. Lisäksi samalla mahdollistetaan Helsingin julkisen ulkovalaistuksen ohjaaminen tulevaisuudessa esimerkiksi liiketunnistimien ja liikennemäärien mukaan [25].

2.3.2 Yleisperiaatteet ja vaatimukset

Helsingin kaupungin julkisen ulkovalaistuksen tarkoituksena on lisätä ihmisten turvallisuutta, viihtyvyyttä ja turvallisuuden tunnetta, jotta jokainen kokisi kaupungin suojaisaksi paikaksi asua, oleskella ja liikkua kaikkina vuoden ja vuorokauden aikoina. Viime vuosina on parannettu etenkin jalankulkujen, pyöriteiden ja liikenteellisesti vaarallisten alueiden valaistusratkaisuja. [24] Julkinen ulkovalaistus syttyy ja sammuu Helsingissä vuorokauden valaistusolojen mukaan. Turvallisuudesta ja valaistuksen tasosta ei ole haluttu tinkiä sammuttamalla valaisimia öisin tai kesäisin, sillä arvioiden mukaan yksikin vakava onnettomuus söisi muodostuneet kustannussäästöt useiden vuosien ajalta [26]. Sen sijaan yön hiljaisina tunteina valaistusta himmennetään paikoissa, joissa se on teknisesti ja turvallisesti mahdollista.

Nykyisin Helsinkiä voidaan pitää erittäin hyvin valaistuna, sillä toimivien valaisimien osuus on kausittaisessa laskennassa viime vuosina ollut noin 98 % [27]. Kaupungissa havaittujen pimeiden valaisimien syitä ovat tavallisesti ilkivalta, valaisimien ja lamppujen vikaantuminen sekä aurauskaluston aiheuttamat vauriot. Helsingin Energian tavoitteena on korjata välitöntä vaaraa aiheuttavat kolari- ja myrskyvauriot viivytyksettä ja muut ulkovalaistusviat keskimäärin 8 vuorokaudessa [27]. Valaistuk-

sen kausihuollot toteutetaan alueittain ja siten, että toimimattomia valaisimia on korkeintaan 4 % [24]. Päivisin palavaan valaistukseen vaikuttavat useimmiten huoltotoimet tai katuvalokeskusten toimintahäiriöt.

Julkisen ulkovalaistuksen on ensisijaisesti mahdollistettava näkeminen, mutta lisäksi sen on oltava teknisesti toimiva, kokonaistaloudellinen, ympäristöystävällinen sekä esteettinen. Euroopan unionissa tie- ja katuvalaistuksen valaistustekniset vaatimukset määritellään standardissa EN 13201-2:2003 (engl. Road Lighting – Part 2: Performance Requirements), mitoitus standardissa EN 13201-3:2003 (engl. Road Lighting – Part 3: Calculation of Performance) ja mittaukset standardissa EN 13201-4:2003 (engl. Road Lighting – Part 4: Methods of Measuring Lighting Performance) [28, 29, 30]. Vaatimuksia asetetaan valaistusluokittain muun muassa joko luminanssille, estohäikäisylle ja ympäristön valaistukselle tai valaistusvoimakkuudelle [28]. Helsingissä käytettävät valaistusluokat ja -periaatteet esitellään Helsingin kaupungin ulkovalaistuksen tarveselvityksessä.

2.3.3 Helsingin kaupungin ulkovalaistuksen tarveselvitys

Tarveselvityksessä määritellään Helsingin kaupungin julkisen ulkovalaistuksen yleiset tarpeet, tavoitteet, suositukset ja suunnitteluperiaatteet. Lisäksi se sisältää valaistusperiaatteet julkisivu- ja erikoisvalaistukselle. Tarveselvityksessä huomioidaan ympäristön toiminnalliset ja kaupunkikuvalliset vaatimukset sekä valaistuksen tekninen toimivuus ja uudistustarpeet. Valaistuksen suunnittelussa keskitytään erityisesti häikäisyn ja häiriövalon minimoimiseen, oleskelun ja liikkumisen turvallisuuden takaamiseen sekä esteettömyyden huomioimiseen. Uusin tarveselvitys toimii Helsingin ulkovalaistuksen budjetoinnin, päätöksenteon, suunnittelun ja kehittämisen perustana seuraavat 20 vuotta. [20]

Kaupungin valaistustavoissa noudatetaan katujen toiminnalliseen luokitukseen, ajoneuvoliikenteen määrään ja nopeuteen sekä julkiseen ja polkupyöräliikenteeseen perustuvaa katuluokkakohtaista valaistusluokitusta. Puistoraittien ja ulkoilureittien tapauksessa valaistusluokkaan vaikuttavat puiston sijainti ja puistoluokka sekä ulkoilureitin sijainti ja ympäristön valoisuus. [20] Taulukossa 2 esitetään Helsingissä käytettävät standardin CEN/TR 13201-1:2004 (engl. Road Lighting – Part 1: Selection of Lighting Classes) mukaiset M- ja P-luokat [31], joiden valaistustekniset vaatimukset perustuvat standardiin EN 13201-2:2003 [28].

Yleisesti tarveselvityksellä tavoitellaan valtaosaan Helsinkiä soveltuvia standardeja valaistusratkaisuja, jotka ovat kustannustehokkaita, kaupunkikuvallisesti yhtenäisiä ja teknisesti laadukkaita. Eri valaistustavoilla, valon väreillä ja valaistusluokilla tuetaan julkisen ulkovalaistusverkon hierarkiaa, jotta esimerkiksi voidaan erottaa ja tunnistaa liikenteellisesti merkittävimmät pääkadut vähemmän liikennöidyistä kaduista myös pimeään aikaan. Päiviseen hierarkiaan on mahdollista vaikuttaa esimerkiksi erilaisilla valaistuslaitteilla, joiden ulkonäöstä annetaan suositukset Helsingin kaupunkikalustehjeessa. [20]

Taulukko 2: Helsingissä käytettävät katu- ja valaistusluokat [20].

Katuluokka	Valaistusluokka
Pääkadut	M1+P1, M2+P2, M3a+P3
Alueelliset kokoojakadut	M3a+P3/P4, M3b+P4
Paikalliset kokoojakadut	M3b+P4, M4+P4/P5
Tonttikadut	M4+P4/P5, M5+P5/P6
Baanaverkko	P2
Puistoraitit	P3, P4
Ulkoilureitit, lenkipolut ja ladut	P5, P6

Tarveselvityksessä [20] asetetaan alueittaiset tavoitteet myös valaistuksen värilämpötilalle ja värintoistoindeksille. Kantakaupungissa, tonttikaduilla, kevyen liikenteen väylillä, aukioilla ja puistoissa suositellaan käytettäväksi valonlähteitä, jotka tuottavat 2 800–3 500 kelvinin valkoista valoa ja omaavat hyvän yli 60 värintoistoindeksin. Pää- ja kokoojakaduilla voidaan kuitenkin valaistusteknisistä ja kustannussyistä edelleen käyttää 2 500 kelvinin ja alle 60 värintoistoindeksin suurpainenatriumlamppuja. Asetettujen tavoitteiden myötä Helsingin julkisessa ulkovalaistuksessa siirrytään valkoiseen ja värintoistoltaan yhä parempaan valoon entistä kattavammin.

3 Tutkimusaineisto ja -menetelmät

Tässä luvussa selostetaan työn tutkimusaineisto ja -menetelmät, joilla voidaan suorittaa tarvittavat elinkaarikustannus- ja kannattavuuslaskelmat. Ensiksi selvitetään Helsingin kaupungin julkisen ulkovalaistusverkon nykytila, sekä tutkitaan sen energiatehokkuutta. Seuraavaksi tutustutaan elinkaarikustannuslaskennassa käytettävään valaistusratkaisuihin, katupoikkileikkauksiin, yhtälöihin ja parametreihin. Lopuksi esitellään vielä kannattavuuslaskennassa sovellettavat saneerausohjelmat, yhtälöt ja parametrit.

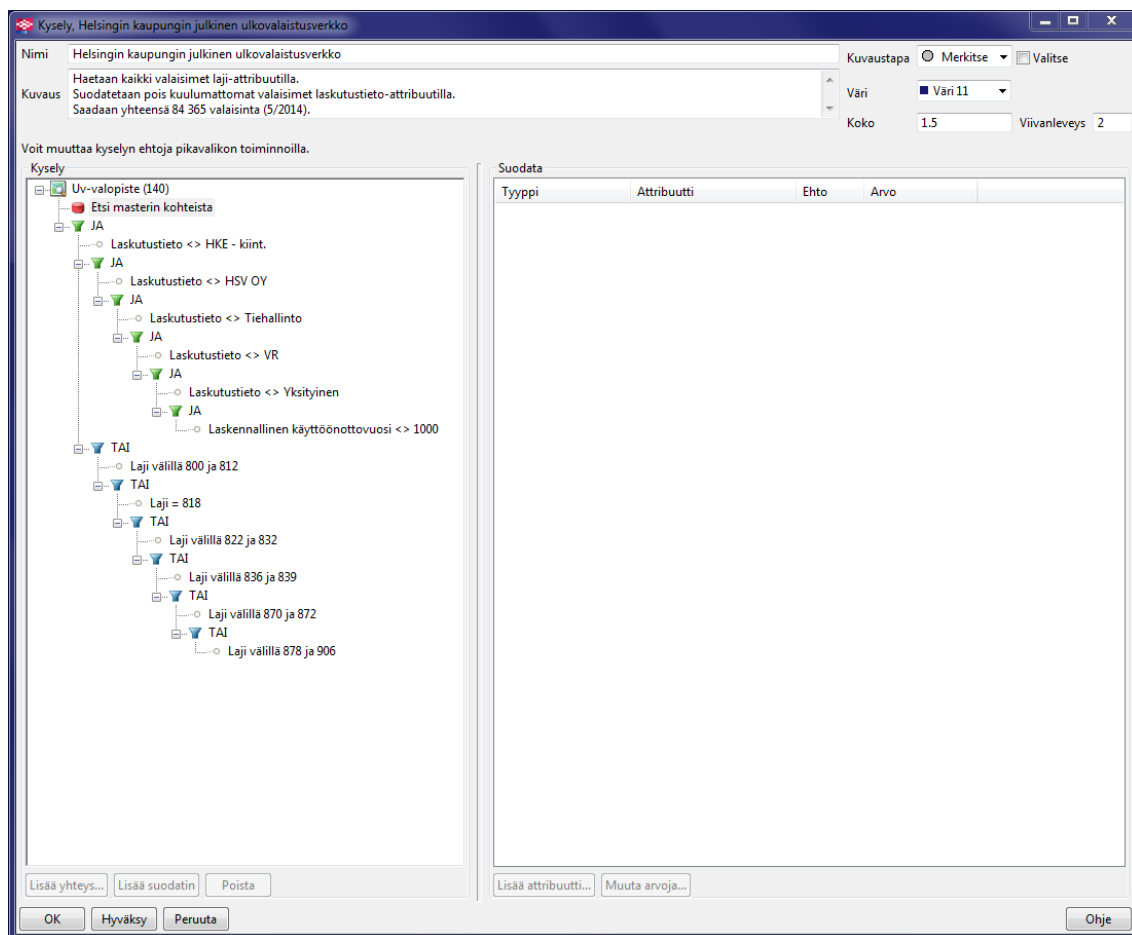
3.1 Helsingin kaupungin julkinen ulkovalaistusverkko

Tavallisesti tie- ja katuvalaistuksen saneerausselvityksissä käsitellään esimerkiksi hankkeiden tavoitteita, valaistuksen nykytilaa ja tyypillisesti käytettyjä valaistusratkaisuja. Lisäksi ehdotettujen toimenpiteiden kannattavuutta vertaillaan elinkaarikustannusten sekä muiden taloudellisten tunnuslukujen perusteella. Useimmiten koko selvityksen perustana toimii valaistuksen nykytilan tutkimus, jossa kartoitetaan tarkasteltavien valaistuslaitteiden ikä- ja sijaintitiedot. [22, 32] Tässä työssä Helsingin kaupungin julkisen ulkovalaistusverkon nykytila selvitettiin Trimble NIS-verkkotietojärjestelmällä, jonka jälkeen sen energiatehokkuutta tutkittiin Microsoft Excelillä.

3.1.1 Nykytila

Julkisen ulkovalaistusverkon kaikki valaisimet etsittiin Trimble NIS-verkkotietojärjestelmän tietokannasta kuvan 8 finder-kyselyllä, jossa useita suodattimia ja loogisia operaattoreita yhdisteltiin erilaisiin attribuuttivertailuihin. Kyselyn vertailuoperaattoreina toimivat yhtä suuri kuin ($=$), erisuuri kuin ($<>$) ja välillä. Havaitaan, että valaisimet haettiin TAI-suodattimilla ja laji-attribuutilla, jolloin kohde läpäisi suodattimen jonkin siihen kohdistuvan ehdon täyttyessä. Huomataan myös, että osa tuloksista suodatettiin pois JA-suodattimilla sekä laskutustieto-attribuutilla, jolloin kohde läpäisi suodattimen vain kaikkien siihen kohdistuvien ehtojen täyttyessä. Tässä työssä Helsingin kaupungin julkiseen ulkovalaistukseen ei sisällytetty Helsingin Energian kiinteistöjen, Helen Sähköverkko Oy:n, Liikenneviraston, VR:n eikä yksityisen sektorin valaisimia. Lisäksi kokonaismäärästä poistettiin vuoden 2014 alussa ELY-keskukselle siirtyneet valaisimet, jotka oli merkitty laskennallinen käyttöönotovuosi -attribuutilla.

Finder-kysely palautti valaisimet graafisesti verkkotietojärjestelmän taustakartalle, jonka jälkeen hakutuloksista tehtiin Excel-raportti. Seuraavaksi tämän raportin sisällöstä luotiin Microsoft Excelillä liite A1, jossa Helsingin kaupungin julkiset ulkovalaisimet esitetään valonlähteiden, lampputehojen ja valaisimien käyttöönottovuosien mukaan. Lisäksi tuloksista laadittiin Trimble NISillä liitteet A2 ja A3, joissa valaisimien sijainnit esitetään kaupungin kartalla valonlähteittäin ja käyttöönottovuosittain.



Kuva 8: Trimble NIS -verkkotietojärjestelmällä luotu finder-kysely.

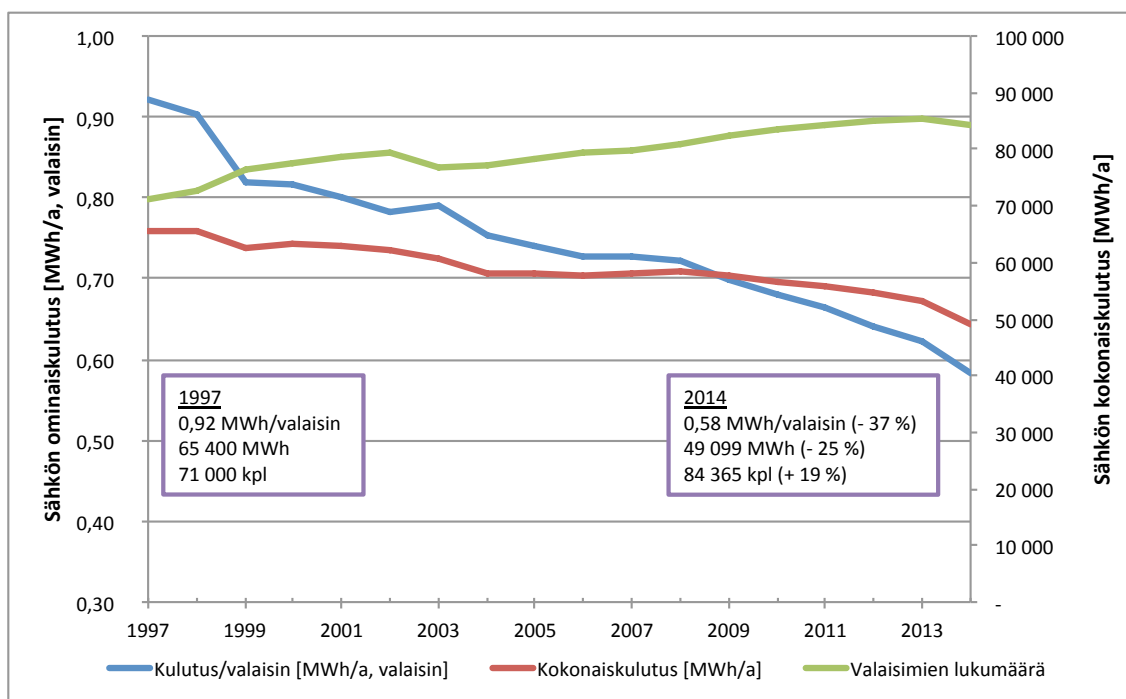
Liitteen A1 ensimmäiseen laskentasarakkeeseen yhdistettiin kaikki ennen vuotta 1984 asennetut valaisimet sekä verkkotietojärjestelmän virheelliset tiedot, sillä tavallisesti tie- ja katuvalaistukselle asetetaan 30 vuoden tekninen elinikä [18]. Havaittiin, että kaikista valaisimista tähän ryhmään kuului noin 18 % ja uudempiin asennuksiin noin 82 %. Lisäksi huomattiin, että valaisimista lähes puolet on otettu käyttöön vuosina 2005–2014. Tässä työssä oletettiin, että kaikkien valaisinpylväiden, kaapelien ja johtojen asennusvuodet vastaavat valaisimien käyttöönottovuotta.

Liitteistä A1, A2 ja A3 nähdään suurpainenatriumlamppujen olevan selkeästi käytetyin julkisen ulkovalaistuksen valonlähde. Myös perinteisiä elohopealamppuvalaisimia on vielä laajasti käytössä eri puolilla Helsinkiä, ja erityisesti kantakaupungissa sijaitsee useita iäkkäitä elohopealampuilla varustettuja ripustusvalaisimia. Lisäksi huomataan, että korvaavia suurpainenatriumlamppuvalaisimia käytetään kattavasti ulkoilureiteilla, lenkipoluilla ja laduilla. Vastaavasti induktiolamppuvalaisimia sijaitsee pääasiassa vain Länsi-Pasilassa ja muutamissa puistoissa. Kaiken kaikkiaan havaitaan monimetallilamppujen ja LEDien yleistyneen viime vuosina Helsingin kaupungin julkisessa ulkovalaistuksessa.

3.1.2 Energiatehokkuus

Helsingin kaupunki tavoittelee hiilidioksidipäästöjen vähentämistä, energiatehokkuuden parantamista ja uusiutuvan energian edistämistä lukuisten eri sitoumuksien ja toimenpideohjelmien avulla. Kaupungin on määrä vähentää hiilidioksidipäästöjään 30 % vuoden 1990 tasosta vuoteen 2020 mennessä. Lisäksi Helsinki on sitoutunut kunta-alan energiatehokkuussopimuksessa vähentämään energiankulutustaan 9 % vuoden 2005 tasosta kaudella 2008–2016. Näihin tavoitteisiin sisältyy yhtenä osana myös kaupungin julkinen ulkovalaistus. [33]

Kuvassa 9 esitetään Helsingin kaupungin julkisen ulkovalaistusverkon sähkönkulutuksen ja valaisimien lukumäärän kehitys vuosina 1997–2014. Havaitaan, että ulkovalaistusverkko sisälsi vuoden 2014 toukokuussa 84 365 valaisinta, joiden vuositaiseksi sähkönkulutukseksi arvioitiin noin 49,1 GWh (5 400 000 €). Tämä vastasi noin 3 %:a kaupungin oman toiminnan energiankulutuksesta ja 5 %:a hiilidioksidipäästöistä. Lisäksi nähdään verkon kokonaiskulutuksen vähentyneen noin 25 % ja valaisinkohtaisen kulutuksen noin 37 % vuosina 1997–2014, vaikka valaisimien lukumäärä on samanaikaisesti lisääntynyt noin 19 %.



Kuva 9: Helsingin julkisen ulkovalaistusverkon energiatehokkuus (5/2014).

Julkisen ulkovalaistusverkon energiatehokkuusohjelman ansiosta kokonaiskulutuksen arvioidaan vähenevän noin 20 % (1 000 000 €) vuoden 2005 tasosta vuoteen 2018 mennessä [33]. Jo nyt tehdyillä toimenpiteillä havaittiin verkon sähkönkulutuksen vähentyneen noin 15 % vuoden 2005 tasosta, joten kunta-alan energiatehokkuussopimuksen säästötavoite ylitetään Helsingin kaupungin julkisessa ulkovalaistuksessa selvästi.

3.2 Elinkaarikustannuslaskenta

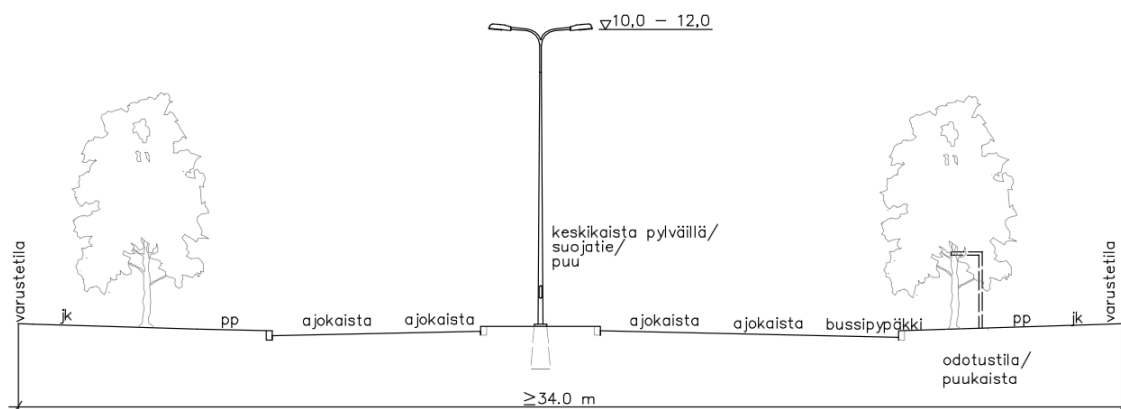
Tie- ja katuvalaistushankkeiden kustannuksia tarkastellaan tavallisesti elinkaarikustannuksilla, jotka koostuvat rakennus- ja hoitokustannuksista sekä jäännösarvoista. Elinkaarikustannuksia hyödynnetään esimerkiksi valaistuksen tarpeellisuuden ja taloudellisen kannattavuuden arvioinnissa, hankkeiden tärkeysjärjestyksen määrittelyssä, toteuttamisohjelman laatimisessa sekä kustannusarvioissa. [18] Tässä työssä valaistuksen saneerauksesta aiheutuvat elinkaarikustannukset ratkaistiin Microsoft Excelillä seuraavien menetelmien, yhtälöiden ja parametrien perusteella.

3.2.1 Valaistusratkaisut ja katupoikkileikkaukset

Ulkovalaistusverkko jaoteltiin muutamaan tyypillisimpään valaistusratkaisuun ja katupoikkileikkaukseen, jotka perustuvat julkisen ulkovalaistuksen nykytilanteeseen ja energiatehokkuusohjelmaan sekä Helsingin kaupungin ulkovalaistuksen tarveselvitykseen. Työssä sovellettiin tavanomaisia pylväs- ja valaisintyyppejä, sillä tarkempia ulkonäkövaatimuksia ei asetettu laskelmien selkeyttämiseksi. Todellisuudessa erilaisia valaistusratkaisuja, poikkileikkauksia ja valaistuslaitteita on lukuisia, muttei niiden kaikkien tarkastelu ole missään määrin mielekäästä.

Pääkadut

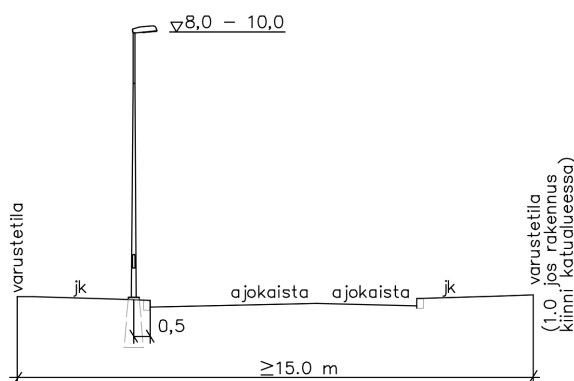
Kuvassa 10 esitetään nelikaistaisen pääkadun poikkileikkaus, jossa on yksisuuntainen pyöräliikenne ja molemminpuolinen jalankulku [20]. Pääkadut palvelevat seudullista ja kaupungin osa-alueiden välistä liikennettä, missä nopeusrajoitus on tavallisesti 50–70 km/h [34]. Oletettiin, että nykyinen valaistus on toteutettu kaksivartisena keskikaista-asennuksena, jossa 250 W elohopealamppuvalaisimien asennuskorkeus on 10 metriä ja valaisinpylväsvali 40 metriä. Kohteessa noudatetaan valaistusluokkaa M3a+P3.



Kuva 10: Pääkadun poikkileikkaus [20].

Kokoojakadut

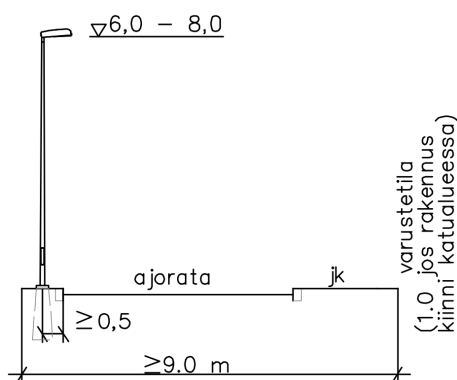
Kuvassa 11 esitetään kaksikaistaisen paikallisen kokoojakadun poikkileikkaus, jossa on sekaliikenne, kadunvarsipysäköinti ja molemminpuolinen jalankulku [20]. Kokoojakadut palvelevat kaupungin osa-alueen sisäistä liikennettä sekä alueen yhteyksiä pää- ja tonttikatuverkkoihin, missä nopeusrajoitus on tavallisesti 40–50 km/h [34]. Oletettiin, että nykyinen valaistus on toteutettu yksirivisenä reunasijoituksena, jossa 250 W elohopealamppuvalaisimien asennuskorkeus on 10 metriä ja valaisinpylväsväli 35 metriä. Kohteessa noudatetaan valaistusluokkaa M3b+P4.



Kuva 11: Kokoojakadun poikkileikkaus [20].

Tonttikadut

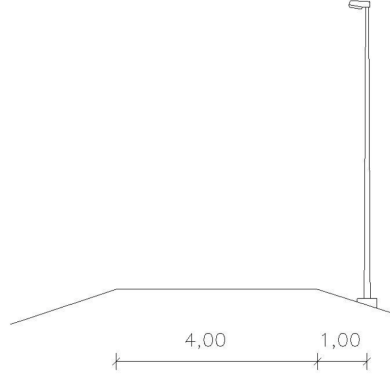
Kuvassa 12 esitetään yksiajorataisen tonttikadun poikkileikkaus, jossa on sekaliikenne ja yksipuolinen jalankulku [20]. Tonttikadut palvelevat katujen varressa olevien tonttien liikennettä, missä nopeusrajoitus on tavallisesti 30–40 km/h [34]. Oletettiin, että nykyinen valaistus on toteutettu yksirivisenä reunasijoituksena, jossa 125 W elohopealamppuvalaisimien asennuskorkeus on 8 metriä ja valaisinpylväsväli 30 metriä. Kohteessa noudatetaan valaistusluokkaa M4+P4.



Kuva 12: Tonttikadun poikkileikkaus [20].

Kevyen liikenteen väylät, aukiot ja puistot

Kuvassa 13 esitetään kevyen liikenteen väylän, aukion ja puiston poikkileikkaus [32]. Kevyen liikenteen väylät, aukiot ja puistot palvelevat jalankulkijoita ja pyöräliikennettä. Oletettiin, että nykyinen valaistus on toteutettu yksirivisenä reunasijoituksena, jossa 125 W elohopealamppuvalaisimien asennuskorkeus on 5 metriä ja valaisinpylväsvali 30 metriä. Kohteessa noudatetaan valaistusluokkaa P4.



Kuva 13: Kevyen liikenteen väylän, aukion ja puiston poikkileikkaus [32].

3.2.2 Rakennuskustannukset

Katupoikkileikkausten valaistusratkaisujen saneerausta tutkittiin sekä valaisimien vaihdoilla että täysin uudella valaistuksella. Pelkkien lamppujen ja liitäntälaitteiden vaihtoja ei käsitelty parhaimman teknisen toimivuuden ja valaistustuloksen saavuttamiseksi. Uudisrakentamisen yhteydessä suoritetuista valaistusteknillisistä mitoituslaskelmista vastasi Aleksanteri Ekrias [32].

Valaisimien vaihtojen rakennuskustannukset koostuvat pääasiassa valaisimien yksikköhinnoista, kun taas uudisrakentamisessa huomioidaan myös pylväiden ja sähköverkon kustannukset. Työssä tarkasteltiin monimetallilamppu-, suurpainenatriumlamppu- ja LED-valaisimia, joiden uudisrakentamisesta aiheutuvat rakennuskustannukset K_{rU} [€/tiemetri] ratkaistiin yhtälöllä 1 ja valaisimien vaihdoista aiheutuvat rakennuskustannukset K_{rV} [€/tiemetri] yhtälöllä 2 [32, 35].

$$K_{rU} = \frac{mH_p + nH_v + SH_{sv}}{S} \cdot k_y, \quad (1)$$

$$K_{rV} = \frac{nH_v}{S}, \quad (2)$$

joissa

K_{rU} on uudisrakentamisen rakennuskustannukset [€/tiemetri]
 m on valaisinpylväiden lukumäärä poikkileikkauksessa [kpl]

H_p	on valaisinpylvään ja jalustan hinta sisältäen asennustyön sekä ympäristäytön [€/kpl]
n	on valaisimien lukumäärä poikkileikkauksessa [kpl]
H_v	on valaisimen hinta sisältäen ensimmäisen valonlähteen ja asennustyön [€/kpl]
S	on valaisinpylväsväli [m]
H_{sv}	on sähköverkon perushinta [€/m]
k_y	on yleiskustannuskerroin [-]
K_{rV}	on valaisimien vaihdon rakennuskustannukset [€/tiemetri].

3.2.3 Hoitokustannukset

Tie- ja katuvalaistuksessa käytettävien purkauslamppuvalaisimien hoitokustannukset koostuvat käytönaikaisista energia- ja kunnossapitokustannuksista, joihin sisältyvät esimerkiksi lamppujen ryhmä- ja yksittäisvaihdot. Tässä työssä purkauslamppuvalaisimien ensimmäisen vuoden hoitokustannukset K_{h1} [€/tiemetri], energiakustannukset K_{e1} [€/tiemetri] sekä kunnossapitokustannukset K_{kp1} [€/tiemetri] ratkaistiin yhtälöillä

$$K_{h1} = K_{e1} + K_{kp1}, \quad (3)$$

$$K_{e1} = \frac{t_1 n P_i H_e}{S}, \quad (4)$$

$$K_{kp1} = \frac{\frac{n H_1}{t_2} + q n H_{ly} + m C}{S}, \quad (5)$$

joissa

K_{h1}	on ensimmäisen vuoden hoitokustannukset [€/tiemetri]
K_{e1}	on ensimmäisen vuoden energiakustannukset [€/tiemetri]
K_{kp1}	on ensimmäisen vuoden kunnossapitokustannukset [€/tiemetri]
t_1	on vuotuinen polttoaika [h]
n	on valaisimien lukumäärä poikkileikkauksessa [kpl]
P_i	on valaisimen teho liitäntälaitteineen [kW/kpl]
H_e	on sähkön kokonaishinta [€/kWh]
S	on valaisinpylväsväli [m]
H_1	on lampun ryhmävaihdon perushinta sisältäen asennustyön [€/kpl]
t_2	on lampun hyötypolttoikä [a]
q	on yksittäisvaihtojen suhteellinen määrä vuosittain [-]
H_{ly}	on lampun yksittäisvaihdon perushinta sisältäen asennustyön [€/kpl]
m	on valaisinpylväiden lukumäärä poikkileikkauksessa [kpl]
C	on kiinteät kustannukset [€/valaisinpylväs]. [32, 35]

Purkauslamppuvalaisimien hoitokustannusten nykyarvo eli laskennalliset hoitokustannukset K_h [€/tiemetri] ratkaistiin yhtälöllä 6, energiakustannusten nykyarvo K_e [€/tiemetri] yhtälöllä 7 ja kunnossapitokustannusten nykyarvo K_{kp} [€/tiemetri] yhtälöllä 8. [32, 35]

$$K_h = K_e + K_{kp}, \quad (6)$$

$$K_e = \sum_{t=0}^{N-1} \left(\frac{1 + \beta_e}{1 + p} \right)^t K_{e1}, \quad (7)$$

$$K_{kp} = \sum_{t=0}^{N-1} \left(\frac{1 + \beta_{kp}}{1 + p} \right)^t K_{kp1}, \quad (8)$$

joissa

K_h	on hoitokustannusten nykyarvo [€/tiemetri]
K_e	on energiakustannusten nykyarvo [€/tiemetri]
K_{kp}	on kunnossapitokustannusten nykyarvo [€/tiemetri]
N	on tarkasteluajanjakson pituus [a]
t	on tarkasteluvuosi [a]
β_e	on energiakustannusten vuotuinen kasvu [-]
p	on hallinnollisesti määrätty laskentakorko [-]
K_{e1}	on ensimmäisen vuoden energiakustannukset [€/tiemetri]
β_{kp}	on kunnossapitokustannusten vuotuinen kasvu [-]
K_{kp1}	on ensimmäisen vuoden kunnossapitokustannukset [€/tiemetri].

Tie- ja katuvalaistuksessa käytettävien LED-valaisimien hoitokustannukset koostuvat käytönaikaisista energia- ja kunnossapitokustannuksista, joihin sisältyvät esimerkiksi valaisimien puhdistukset sekä valaisimien tai moduulien ja liitäntälaitteiden ryhmä- ja yksittäisvaihdot. Tässä työssä LED-valaisimien ensimmäisen vuoden hoitokustannukset $K_{h1, LED}$ [€/tiemetri], energiakustannukset $K_{e1, LED}$ [€/tiemetri] sekä kunnossapitokustannukset $K_{kp1, LED}$ [€/tiemetri] ratkaistiin yhtälöillä

$$K_{h1, LED} = K_{e1, LED} + K_{kp1, LED}, \quad (9)$$

$$K_{e1, LED} = \frac{t_1 n P_i H_e}{S} \cdot k_v, \quad (10)$$

$$K_{kp1, LED} = \frac{\frac{n H_{1, LED}}{t_{2, LED}} + q n H_{ly, LED} + m C}{S}, \quad (11)$$

joissa

$K_{h1, LED}$	on LED-valaisimien ensimmäisen vuoden hoitokustannukset [€/tiemetri]
$K_{e1, LED}$	on LED-valaisimien ensimmäisen vuoden energiakustannukset [€/tiemetri]
$K_{kp1, LED}$	on LED-valaisimien ensimmäisen vuoden kunnossapitokustannukset [€/tiemetri]

t_1	on vuotuinen polttoaika [h]
n	on valaisimien lukumäärä poikkileikkauksessa [kpl]
P_1	on valaisimen teho liitäntälaitteineen [kW/kpl]
H_e	on sähkön kokonaishinta [€/kWh]
S	on valaisinpylväsväli [m]
k_v	on vakiovalovirtaohjauskerroin [-]
$H_{1, \text{LED}}$	on LED-valaisimen tai moduulin ja liitäntälaitteen ryhmävaihdon perushinta sisältäen asennustyön sekä valaisimen eliniän aikaiset puhdistuskustannukset [€/kpl]
$t_{2, \text{LED}}$	on LED-valaistusratkaisun tarkasteluajanjakson pituus [a]
q	on yksittäisvaihtojen suhteellinen määrä vuosittain [-]
$H_{ly, \text{LED}}$	on LED-valaisimen, moduulin tai liitäntälaitteen yksittäisvaihdon perushinta sisältäen asennustyön [€/kpl]
m	on valaisinpylväiden lukumäärä poikkileikkauksessa [kpl]
C	on kiinteät kustannukset [€/valaisinpylväs]. [32, 35]

LED-valaisimien hoitokustannusten nykyarvo eli laskennalliset hoitokustannukset $K_{h, \text{LED}}$ [€/tiometri] ratkaistiin yhtälöllä 12, energiakustannusten nykyarvo $K_{e, \text{LED}}$ [€/tiometri] yhtälöllä 13 ja kunnossapitokustannusten nykyarvo $K_{kp, \text{LED}}$ [€/tiometri] yhtälöllä 14. [32, 35]

$$K_{h, \text{LED}} = K_{e, \text{LED}} + K_{kp, \text{LED}}, \quad (12)$$

$$K_{e, \text{LED}} = \sum_{t=0}^{N-1} \left(\frac{1 + \beta_e}{1 + p} \right)^t K_{e1, \text{LED}}, \quad (13)$$

$$K_{kp, \text{LED}} = \sum_{t=0}^{N-1} \left(\frac{1 + \beta_{kp}}{1 + p} \right)^t K_{kp1, \text{LED}}, \quad (14)$$

joissa

$K_{h, \text{LED}}$	on LED-valaisimien hoitokustannusten nykyarvo [€/tiometri]
$K_{e, \text{LED}}$	on LED-valaisimien energiakustannusten nykyarvo [€/tiometri]
$K_{kp, \text{LED}}$	on LED-valaisimien kunnossapitokustannusten nykyarvo [€/tiometri]
N	on tarkasteluajanjakson pituus [a]
t	on tarkasteluvuosi [a]
β_e	on energiakustannusten vuotuinen kasvu [-]
p	on hallinnollisesti määrätty laskentakorko [-]
$K_{e1, \text{LED}}$	on LED-valaisimien ensimmäisen vuoden energiakustannukset [€/tiometri]
β_{kp}	on kunnossapitokustannusten vuotuinen kasvu [-]
$K_{kp1, \text{LED}}$	on LED-valaisimien ensimmäisen vuoden kunnossapitokustannukset [€/tiometri].

3.2.4 Elinkaarikustannukset

Valaistuksen saneerauksesta aiheutuvat tarkasteluajanjakson eri vuosille kohdistuvat rakennus- ja hoitokustannukset sekä jäännösarvot saatiin keskenään vertailukelpoisiksi diskonttaamalla ne hallinnollisesti määrättyllä laskentakorolla hankkeen käyttöönottovuoteen eli nykyarvoon [18]. Työn rakennuskustannuksissa ei huomioitu valaistuslaitteiden yksikköhintojen muutoksia eikä korkokustannuksia, mutta niiden sijasta huomioitiin energia- ja kunnossapitokustannusten vuotuinen kasvu. Jäännösarvolla arvioitiin valaistuksen purkamis- ja kierrätyskustannuksia sen elinkaaripäätyessä. Tässä työssä purkauslamppuvalaisimien elinkaarikustannusten nykyarvo E_k [€/tiemetri] ja LED-valaisimien elinkaarikustannusten nykyarvo $E_{k, LED}$ [€/tiemetri] ratkaistiin yhtälöillä

$$E_k = K_{rU/V} + K_h + \frac{J}{(1+p)^{N-1}}, \quad (15)$$

$$E_{k, LED} = K_{rU/V} + K_{h, LED} + \frac{J}{(1+p)^{N-1}}, \quad (16)$$

joissa

E_k	on elinkaarikustannusten nykyarvo [€/tiemetri]
$K_{rU/V}$	on uudisrakentamisen tai valaisimien vaihdon rakennuskustannukset [€/tiemetri]
K_h	on hoitokustannusten nykyarvo [€/tiemetri]
J	on jäännösarvo [€/tiemetri]
p	on hallinnollisesti määrätty laskentakorko [-]
N	on tarkasteluajanjakson pituus [a]
$E_{k, LED}$	on LED-valaisimien elinkaarikustannusten nykyarvo [€/tiemetri]
$K_{h, LED}$	on LED-valaisimien hoitokustannusten nykyarvo [€/tiemetri]. [32, 35]

3.2.5 Parametrit

Tämän työn elinkaarikustannuslaskelmissa sovellettiin liitteissä B1 ja B2 esitettyjä katupoikkileikkauskohtaisia valaistuslaitteiden ominaisuuksia sekä Helsingin Energian keskimääräisiä yksikkö-, asennustyö- ja huoltotyöhintoja [26, 27, 36, 37, 38]. Lisäksi noudatettiin liitteen B3 ulkovalaistuksen ohjausperiaatteita [32], ja käytettiin seuraavia parametreja:

- Tarkasteluajanjakson pituus N on 30 vuotta.
- Sähkön kokonaishinta H_e on 0,11 €/kWh.
- Energiakustannusten vuotuinen kasvu β_e on 3 %.
- Kunnossapitokustannusten vuotuinen kasvu β_{kp} on 3 %.
- Hallinnollisesti määrätty laskentakorko p on 6 %.
- Vuotuinen polttoaika t_1 on 4 000 h.

- Uudisrakentamisen yleiskustannuskerroin k_y on 15 %, johon sisältyvät esimerkiksi suunnittelut, työaikaisten hoitokustannukset sekä liikennejärjestelyt.
- Laskennallinen jäännösarvo J on 25 % rakennuskustannuksista.
- Sähköverkon perushinta H_{sv} on katujen tapauksessa 85 €/m ja kevyen liikenteen väylien, aukoiden ja puistojen tapauksessa 70 €/m [38].

LED-valaisimet ovat viime vuosina kehittyneet merkittävästi, mikä tekee niiden tuote- ja hintakehityksen ennustamisesta erittäin haastavaa tämän työn 30 vuoden tarkasteluajan kannalta. Helsingin kaupungin rakennusvirastolle ja Helsingin Energialle ei myöskään ole vielä kertynyt pitkän ajanjakson kokemuksia niiden kunnossapitotarpeista ja -kustannuksista [37]. Tässä työssä LED-valaisimista tehtiin seuraavat oletukset:

- LED-valaisin tai moduuli ja liitäntälaitte vaihdetaan 15 vuoden kuluttua, jolloin vaihtohinta on 40 % valaisimen nykyisestä hinnasta [32].
- LED-valaisimen teho P_i on 80 % alkuperäisestä arvosta valaisimen tai moduulin ja liitäntälaitteen ryhmävaihdon jälkeen [32].
- LED-valaisimet puhdistetaan ulkoapäin viiden vuoden välein 10 euron yksikköhinnalla [37].
- LED-valaisimien vakiovalovirtaohjaus k_v säästää energiaa noin 10 % [32].
- Valaistuksen ohjaus pidentää LED-valaisimien elinikää.

3.3 Kannattavuuslaskenta

Tie- ja katuvalaistushankkeiden kannattavuutta tarkastellaan tavallisesti laskennallisilla menetelmillä, joissa eriaikaisia ja erilaisia vaikutuksia yhdistellään edullisuutta kuvaaviksi liikennetaloudellisiksi tunnusluvuiksi. Tunnusluvuista käytetyimpiä ovat hyöty-kustannussuhde ja ensimmäisen vuoden tuotto. Toisinaan hankkeiden vertailuissa käytetään myös nykyarvoja ja sisäisiä korkoja. [18] Tässä työssä ”Helsinki LED” -hankkeen kannattavuutta arvioitiin Microsoft Excelillä seuraavien menetelmien, yhtälöiden ja parametrien perusteella.

3.3.1 ”Helsinki LED” -hanke ja vaihtoehtoiset saneerausohjelmat

Ulkovalaistusverkon saneerauksen kannattavuutta tutkittiin ”Helsinki LED” -hankkeen lisäksi myös kahdella vaihtoehtoisella saneerausohjelmalla, jotka perustuvat julkisen ulkovalaistuksen nykytilanteeseen ja energiatehokkuusohjelmaan, Helsingin kaupungin ulkovalaistuksen tarveselvitykseen sekä luvun 3.2 elinkaarikustannuslaskentaan. Työssä oletettiin, että kaikki yli 30-vuotiaat valaistusratkaisut ovat elinkaarensa päässä ja ne kannattaa uusia kokonaan. Vastaavasti valaisimien vaihtojen oletettiin olevan suositeltavaa, mikäli valaisinpylväät, valaisinvarret, jalustat ja sähköjakolaitteet ovat hyvässä kunnossa ja niiden jäljellä oleva elinikä on riittävä.

”Helsinki LED” -hanke

”Helsinki LED” -hankkeen toimenpiteet perustuvat Helsingin kaupunginhallituksen vuoden 2014 talousarvioneuvotteluihin. Hankkeessa saneerataan julkisen ulkovalaistusverkon kaikki purkauslamppuvalaisimet LED-valaisimilla. Saneeraukset suoritetaan vuoden 2016 loppuun mennessä, mikä noudattaa talousarvioneuvotteluissa asetettua aikataulua. [1] Lisäksi uudisrakentaminen toteutetaan vuodesta 2015 alkaen LED-valaistusratkaisuilla.

Pääosa saneerauksista, noin 67 300 kappaletta, toteutetaan valaisimien vaihdoilla ja noin 13 600 kappaletta täysin uudella valaistuksella perustuen ulkovalaistusverkon nykytilanteeseen. Puupylväiden valaisimien vaihtojen yhteydessä vaihdetaan tapauskohtaisesti myös valaisinvarret ja -johdot. Näiden saneerausten arvioitiin edellyttävän lisähenkilöstöä esimerkiksi hankkeiden koordinoimiseen, suunnitteluttamiseen, rakennuttamiseen sekä dokumentointiin [26]. Lisäksi purkauslampuilla toteutetut noin 2 500 sillanalus- ja tunnelivalaisinta korvataan asennustavaltaan vastaavilla LED-valaistusratkaisuilla. Katupoikkileikkausten valaistusratkaisujen saneerauksissa noudatetaan seuraavia periaatteita:

- Pääkadut valaistetaan LED-valaisimilla, mikä vastaa noin 16 %:a kaikista saneerauksista.
- Kokoojakadut valaistetaan LED-valaisimilla, mikä vastaa noin 16 %:a kaikista saneerauksista.
- Tonttikadut valaistetaan LED-valaisimilla, mikä vastaa noin 27 %:a kaikista saneerauksista.
- Kevyen liikenteen väylät, aukiot ja puistot valaistetaan LED-valaisimilla, mikä vastaa noin 41 %:a kaikista saneerauksista.

Vaihtoehtoinen saneerausohjelma I

Vaihtoehtoisen saneerausohjelman I toimenpiteet perustuvat julkisen ulkovalaistusverkon energiatehokkuusohjelmaan, Helsingin kaupungin ulkovalaistuksen tarveselvitykseen sekä tämän työn elinkaarikustannuslaskelmiin. Hankkeessa saneerataan ulkovalaistusverkon kaikki elohopealamppuvalaisimet pääosin LED-valaisimilla. Saneeraukset suoritetaan vuoden 2018 loppuun mennessä, mikä noudattaa energiatehokkuusohjelman aikataulua. Lisäksi uudisrakentaminen toteutetaan vuodesta 2015 alkaen pääasiassa LED-valaistusratkaisuilla.

Valtaosa saneerauksista, noin 5 050 kappaletta, toteutetaan täysin uudella valaistuksella ja noin 3 250 kappaletta valaisimien vaihdoilla perustuen ulkovalaistusverkon nykytilanteeseen. Puupylväiden valaisimien vaihtojen yhteydessä vaihdetaan myös valaisinvarret ja -johdot. Näiden saneerausten toteuttamisen arvioitiin olevan mahdollista nykyisellä henkilöstöllä [26]. Lisäksi elohopealampuilla toteutetut noin

1 700 sillanalus- ja tunnelivalaisinta korvataan asennustavaltaan vastaavilla LED-valaistusratkaisuilla. Katupoikkileikkausten valaistusratkaisujen saneerauksissa noudatetaan seuraavia periaatteita:

- Pääkadut valaistaan suurpainenatriumlamppuvalaisimilla, mikä vastaa noin 4 %:a kaikista saneerauksista.
- Kokoojakadut valaistaan LED-valaisimilla, mikä vastaa noin 20 %:a kaikista saneerauksista.
- Tonttikadut valaistaan LED-valaisimilla, mikä vastaa noin 33 %:a kaikista saneerauksista.
- Kevyen liikenteen väylät, aukiot ja puistot valaistaan LED-valaisimilla, mikä vastaa noin 43 %:a kaikista saneerauksista.

Vaihtoehtoinen saneerausohjelma II

Vaihtoehtoinen saneerausohjelma II on ”Helsinki LED” -hankkeen ja vaihtoehtoisen saneerausohjelman I välimuoto. Hankkeessa saneerataan julkisen ulkovalaistusverkon kaikki elohopealamppuvalaisimet, korvaavat purkauslamppuvalaisimet sekä osa elinkaarensa päässä olevista suurpainenatriumlamppuvalaisimista LED-valaisimilla. Saneeraukset suoritetaan vuoden 2018 loppuun mennessä, mikä noudattaa julkisen ulkovalaistusverkon energiatehokkuusohjelman aikataulua. Lisäksi uudisrakentaminen toteutetaan vuodesta 2015 alkaen pääosin LED-valaistusratkaisuilla.

Enemmistö saneerauksista, noin 12 300 kappaletta, toteutetaan valaisimien vaihdoilla ja noin 10 400 kappaletta täysin uudella valaistuksella perustuen ulkovalaistusverkon nykytilanteeseen. Puupylväiden valaisimien vaihtojen yhteydessä vaihdetaan tapauskohtaisesti myös valaisinvarret ja -johdot. Näiden saneerausten arvioitiin edellyttävän lisähenkilöstöä esimerkiksi hankkeiden koordinoimiseen, suunnitteluttamiseen, rakennuttamiseen sekä dokumentointiin [26]. Lisäksi purkauslamppuilla toteutetut noin 2 500 sillanalus- ja tunnelivalaisinta korvataan asennustavaltaan vastaavilla LED-valaistusratkaisuilla. Katupoikkileikkausten valaistusratkaisujen saneerauksissa noudatetaan seuraavia periaatteita:

- Pääkadut valaistaan LED-valaisimilla, mikä vastaa noin 9 %:a kaikista saneerauksista.
- Kokoojakadut valaistaan LED-valaisimilla, mikä vastaa noin 11 %:a kaikista saneerauksista.
- Tonttikadut valaistaan LED-valaisimilla, mikä vastaa noin 15 %:a kaikista saneerauksista.
- Kevyen liikenteen väylät, aukiot ja puistot valaistaan LED-valaisimilla, mikä vastaa noin 65 %:a kaikista saneerauksista.

3.3.2 Kustannukset ja säästöt

Työn kannattavuuslaskelmat perustuvat tämän työn elinkaarikustannuslaskennassa ratkaistuihin valaistuksen saneerauksesta aiheutuviin tiemetrikustannuksiin. Ensiksi saneerattavien valaisimien määriä, katupoikkileikkauskohtaisia saneerausperiaatteita sekä valaisinpylväsvälejä käytettiin valaistavien matkojen selvittämiseksi. Seuraavaksi näitä matkoja kerrottiin katupoikkileikkauskohtaisilla rakennuskustannuksilla sekä ensimmäisen vuoden energia- ja kunnossapitokustannuksilla, jonka myötä saatiin vastaavat arvot euromääräisinä ”Helsinki LED” -hankkeelle ja vaihtoehtoisille saneerausohjelmille.

Hankkeiden taloudellista kannattavuutta tarkasteltiin investointikustannusten sekä saneerauksilla saavutettavien ensimmäisen vuoden hoitokustannus-, energia- ja hiilidioksidipäästösäästöjen perusteella. Lisäksi investointikustannuksia ja hoitokustannussäästöjä hyödynnettiin saneerausohjelmien nettonykyarvojen, sisäisten korkokantojen sekä takaisinmaksuaikojen ratkaisemisessa. Menetelmien valinnat perustuvat Helsingin kaupunginhallituksen vuoden 2014 talousarvioneuvotteluissa asetamiin vaatimuksiin [1].

Investointikustannukset muodostettiin lisäämällä uudisrakentamisen ja valaisimien vaihtojen rakennuskustannuksiin arvioidut lisähenkilöstökustannukset. Hoitokustannus- ja energiasäästöt ratkaistiin yksinkertaisesti vähentämällä uudet arvot nykyisistä, ja hiilidioksidipäästösäästöt käyttämällä Helsingin Energian vuoden 2013 sähkön päästökerrointa.

3.3.3 Nettonykyarvo ja sisäinen korkokanta

”Helsinki LED” -hankkeen ja vaihtoehtoisten saneerausohjelmien toteuttamisesta aiheutuvat tarkasteluajanjakson eri vuosille kohdistuvat investointikustannukset, hoitokustannussäästöt sekä jäännösarvot saatiin keskenään vertailukelpoisiksi yhtälön 17 nettonykyarvomenetelmällä (engl. Net Present Value, NPV). Menetelmässä kaikki tulo- ja menokassavirrat diskontataan hallinnollisesti määrättyllä laskentakorolla hankkeen valmistumisvuoteen [39].

$$NPV = -K_0 + \sum_{t=0}^{N-1} \left(\frac{1 + \beta_e}{1 + p} \right)^t S_{e1} + \sum_{t=0}^{N-1} \left(\frac{1 + \beta_{kp}}{1 + p} \right)^t S_{kp1} - \frac{J}{(1 + p)^{N-1}}, \quad (17)$$

jossa

NPV	on nettonykyarvo [€]
K_0	on investointikustannukset [€]
N	on tarkasteluajanjakson pituus [a]
t	on tarkasteluvuosi [a]
β_e	on energiakustannusten vuotuinen kasvu [-]
p	on hallinnollisesti määrätty laskentakorko [-]

S_{e1}	on ensimmäisen vuoden energiakustannussäästöt [€]
β_{kp}	on kunnossapitokustannusten vuotuinen kasvu [-]
S_{kp1}	on ensimmäisen vuoden kunnossapitokustannussäästöt [€]
J	on jäännösarvo [€].

Havaitaan, ettei investointikustannuksissa huomioitu valaistuslaitteiden yksikköhintojen muutoksia eikä korkokustannuksia, mutta niiden sijasta huomioitiin energia- ja kunnossapitokustannusten vuotuinen kasvu. Jäännösarvolla arvioitiin valaistuksen purkamis- ja kierrätyskustannuksia sen elinkaaren päättyessä. Työssä selvitetiin myös sisäinen korkokanta (engl. Internal Rate of Return, IRR), jolla hankkeen nettonykyarvo on nolla. Hanke todetaan kannattavaksi nettonykyarvon ollessa positiivinen ja sisäisen korkokannan ollessa vähintään asetetun laskentakoron eli tuotovaatimuksen suuruinen [39].

3.3.4 Takaisinmaksuaika

Tavallisesti nettonykyarvojen ja sisäisten korkokantojen yhteydessä käytetään myös takaisinmaksuaikoja, joita voidaan tarkastella sekä korottomina että diskontattuina. Koroton takaisinmaksuaika ei takaa kannattavuutta, sillä se ei huomioi esimerkiksi rahan aika-arvoa, takaisinmaksuajan jälkeisiä kassavirtoja eikä jäännösarvoja. [39] Näistä ensimmäinen voidaan kuitenkin helposti huomioida diskontatulla takaisinmaksuajalla N_d , joka tässä työssä ratkaistiin yhtälöllä 18. Havaitaan, että sillä kuvattiin aikaa, jolloin kumulatiiviset hoitokustannussäästöt kattavat hankkeen investointikustannukset [39]. Hanke todetaan kannattavaksi takaisinmaksuajan alittaessa työn 30 vuoden tarkasteluajanjakson.

$$\sum_{t=0}^{N_d} \left(\frac{1 + \beta_e}{1 + p} \right)^t S_{e1} + \sum_{t=0}^{N_d} \left(\frac{1 + \beta_{kp}}{1 + p} \right)^t S_{kp1} = K_0, \quad (18)$$

jossa

N_d	on diskontattu takaisinmaksuaika [a]
t	on tarkasteluvuosi [a]
β_e	on energiakustannusten vuotuinen kasvu [-]
p	on hallinnollisesti määrätty laskentakorko [-]
S_{e1}	on ensimmäisen vuoden energiakustannussäästöt [€]
β_{kp}	on kunnossapitokustannusten vuotuinen kasvu [-]
S_{kp1}	on ensimmäisen vuoden kunnossapitokustannussäästöt [€]
K_0	on investointikustannukset [€].

3.3.5 Parametrit

Tämän työn kannattavuuslaskelmissa hyödynnettiin liitteiden B1 ja B2 elinkaarikustannuslaskelmien parametreja sekä katupoikkileikkauskohtaisia rakennus-, energia- ja kunnossapitokustannuksia. Sovellettiin myös liitteissä C1–C3 esitettyjä sillanalus- ja tunnelivalaisimien ominaisuuksia, yksikköhintoja sekä kunnossapitokustannuksia

[36]. Lisäksi noudatettiin liitteen B3 ulkovalaistuksen ohjausperiaatteita [32], ja käytettiin seuraavia parametreja:

- ”Helsinki LED” -hankkeen oletettiin vaativan 14 lisähenkilötyövuotta, kustannuksiltaan noin 1,4 miljoonaa euroa, vuosille 2015–2016 [26, 27].
- Vaihtoehtoisen saneerausohjelman II oletettiin vaativan 16 lisähenkilötyövuotta, kustannuksiltaan noin 1,6 miljoonaa euroa, vuosille 2015–2018 [26, 27].
- Hiilidioksidipäästösäästöjä arvioitiin päästökertoimella 217 t/GWh [40].

Työssä oletettiin, että vaihtoehtoisten saneerausohjelmien pidempien aikataulujen ja pienempien valaisimien määrien myötä osa saneerauksista voidaan toteuttaa katu-
jen perusparantamisten yhteydessä tai yhteistyössä kaupungin muiden rakentajien kanssa. Siten saadaan madallettua sähköverkon rakennuskustannuksia, joista tehtiin seuraavat oletukset:

- Sähköverkon perushinta H_{sv} on 30 % pienempi saneerausohjelmassa I kuin ”Helsinki LED” -hankkeessa [26].
- Sähköverkon perushinta H_{sv} on 10 % pienempi saneerausohjelmassa II kuin ”Helsinki LED” -hankkeessa [26].

4 Tulokset

Tässä luvussa esitetään työn tutkimustulokset, sekä vastataan johdannossa esitettyihin tavoitteisiin ja tutkimuskysymyksiin. Ensiksi kerrotaan elinkaarikustannuslaskennan tulokset katupoikkileikkauksittain. Seuraavaksi selostetaan kannattavuuslaskennan tulokset saneerausohjelmittain. Lopuksi suoritetaan vielä herkkyysanalyysi. Tutkimustulosten merkittävyyttä ja luotettavuutta tarkastellaan luvussa 5, jossa esitetään myös yhteenveto ja suositukset.

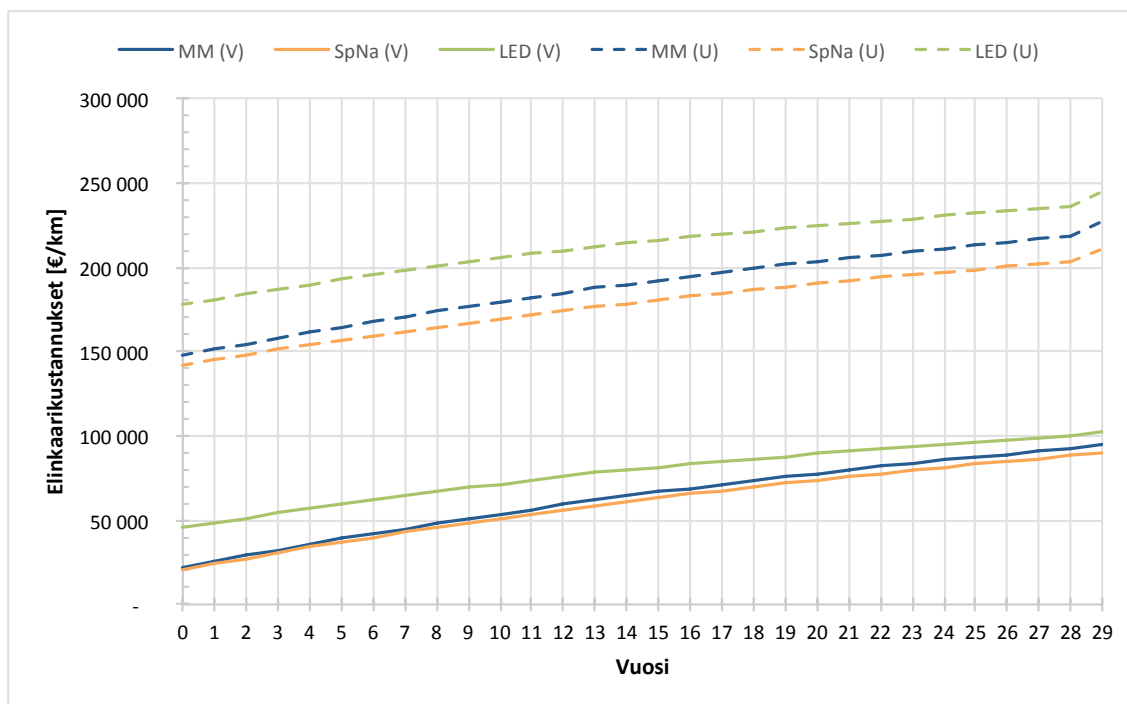
4.1 Elinkaarikustannuslaskelmat

Helsingin kaupungin julkisen ulkovalaistuksen saneerausta tutkittiin sekä valaisimien vaihdoilla että uudisrakentamisella, ja tarkasteltavina valaistusratkaisuina toimivat monimetallilamppu-, suurpainenatriumlamppu- ja LED-valaisimet. Saneerauksista aiheutuvat elinkaarikustannukset ratkaistiin katupoikkileikkauksittain, jotka perustuvat julkisen ulkovalaistuksen nykytilanteeseen ja energiatehokkuusohjelmaan sekä Helsingin kaupungin ulkovalaistuksen tarveselvitykseen. Elinkaarikustannuslaskelmat soveltuvat uudisrakentamisen ja elinkaarensa päässä olevan valaistuksen saneerauksen kokonaistaloudellisuuden arviointiin. Laskennassa sovelletut menetelmät, yhtälöt sekä parametrit selostetaan yksityiskohtaisemmin luvussa 3.2 ja Excel-laskelmat liitteissä B1–B2.

4.1.1 Pääkadut

Kuvassa 14 esitetään pääkatujen valaistuksen saneerauksesta aiheutuvat elinkaarikustannukset, kun joko vain valaisimet vaihdetaan tai koko valaistus uusitaan. Havaitaan, että saneeraukset kannattaa molemmissa tapauksissa toteuttaa suurpainenatriumlamppuvalaisimilla, jotka ovat rakennus- ja elinkaarikustannuksiltaan kaikkein suotuisin vaihtoehto. Tulokset tukevat Helsingin kaupungin ulkovalaistuksen tarveselvityksessä asetettuja valaistusverkon värilämpötila- ja hierarkiatavoitteita, joiden mukaan pääkaduilla voidaan valaistusteknisistä ja kustannussyistä käyttää suurpainenatriumlamppuja [20].

Elinkaarikustannuslaskelmat osoittivat, ettei valaistuksen saneerauksia suositella toteutettaviksi LED-valaisimilla, sillä niiden rakennuskustannukset olivat valaisimien vaihtojen yhteydessä noin 150 % ja uudisrakentamisessa noin 26 % suuremmat kuin suurpainenatriumlamppuvalaisimien. Tämä aiheutui pääasiassa huomattavasti suuremmista valaisimien hinnoista. Toisaalta LED-valaisimien ensimmäisen vuoden hoitokustannukset olivat valaisimien vaihtojen yhteydessä noin 15 % pienemmät ja uudisrakentamisessa lähes yhtä suuret. Ne eivät kuitenkaan tee LEDeistä kokonaistaloudellisinta vaihtoehtoa työn tarkasteluajanjakson aikana.

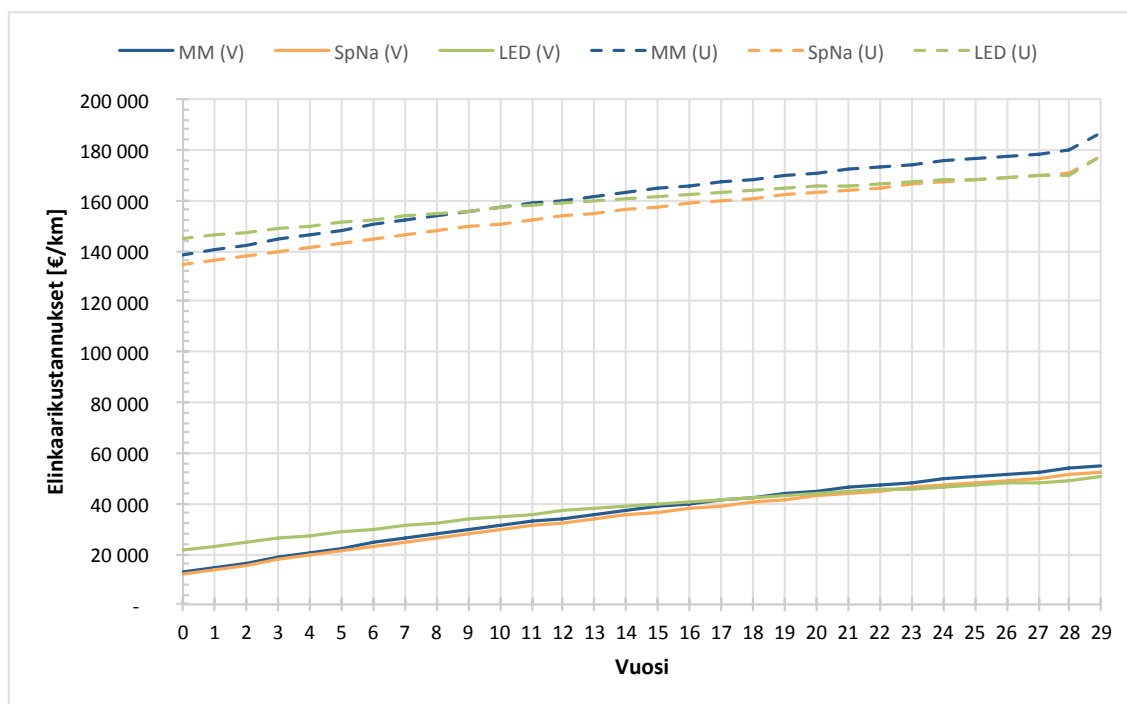


Kuva 14: Monimetallilamppu-, suurpainenatriumlamppu- ja LED-valaisimien vaihdoista (V) ja uudisrakentamisesta (U) aiheutuvat kumulatiiviset elinkaarikustannukset pääkaduilla.

4.1.2 Kokoojakadut

Kuvassa 15 esitetään kokoojakatujen valaistuksen saneerauksesta aiheutuvat elinkaarikustannukset, kun joko vain valaisimet vaihdetaan tai koko valaistus uusitaan. Huomataan, että saneeraukset kannattaa molemmissa tapauksissa toteuttaa LED-valaisimilla, jotka ovat elinkaarikustannuksiltaan kaikkein suotuisin vaihtoehto. Tulokset poikkeavat Helsingin kaupungin ulkovalaistuksen tarveselvityksessä asetetuista suosituksista, joiden mukaan kokoojakaduilla voidaan valaistusteknisistä ja kustannussyistä käyttää suurpainenatriumlamppuja [20].

Elinkaarikustannuslaskelmat osoittivat, että valaistuksen saneeraukset suositellaan toteutettaviksi LED-valaisimilla, vaikka niiden rakennuskustannukset olivatkin valaisimien vaihtojen yhteydessä noin 106 % ja uudisrakentamisessa noin 8 % suuremmat kuin suurpainenatriumlamppuvalaisimien. Toisaalta LED-valaisimien ensimmäisen vuoden hoitokustannukset olivat valaisimien vaihtojen yhteydessä ja uudisrakentamisessa noin 26 % pienemmät. Ne tekevät LEDeistä kokonaistaloudellisen vaihtoehdon valaisimien vaihdoissa tarkasteluvuoden 23 ja uudisrakentamisessa vuoden 27 lopussa.

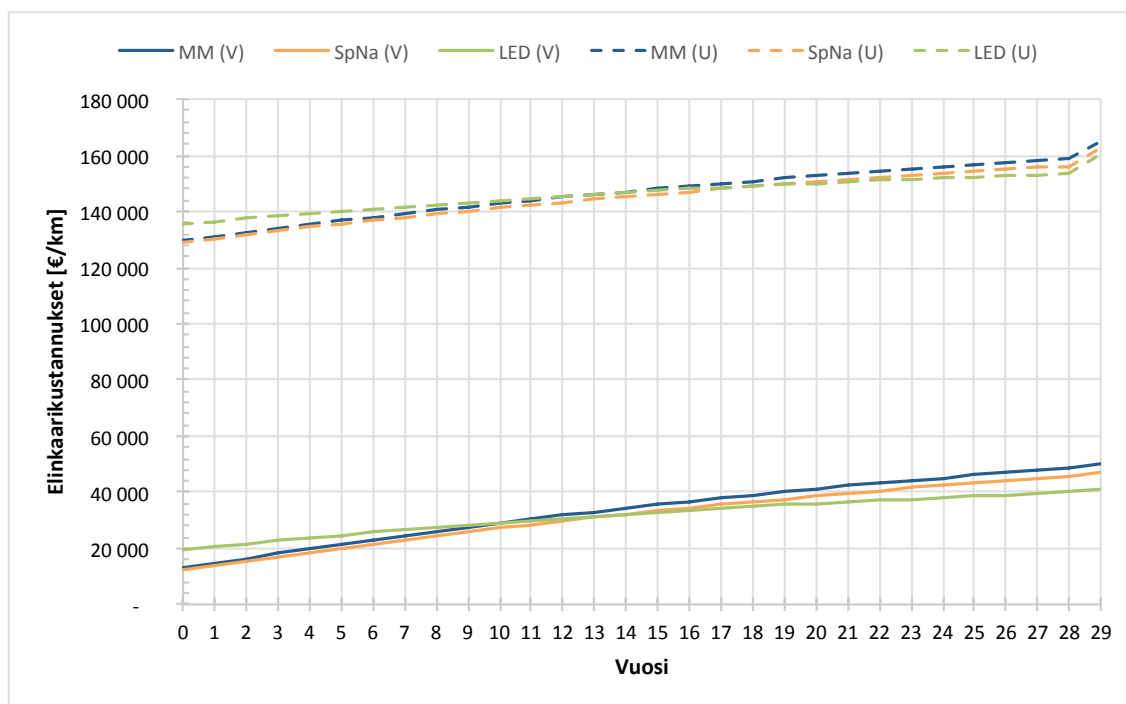


Kuva 15: Monimetallilamppu-, suurpainenatriumlamppu- ja LED-valaisimien vaihdoista (V) ja uudisrakentamisesta (U) aiheutuvat kumulatiiviset elinkaarikustannukset kokoojakaduilla.

4.1.3 Tonttikadut

Kuvassa 16 esitetään tonttikatujen valaistuksen saneerauksesta aiheutuvat elinkaarikustannukset, kun joko vain valaisimet vaihdetaan tai koko valaistus uusitaan. Nähdään, että saneeraukset kannattaa molemmissa tapauksissa toteuttaa LED-valaisimilla, jotka ovat elinkaarikustannuksiltaan kaikkein suotuisin vaihtoehto. Tulokset tukevat Helsingin kaupungin ulkovalaistuksen tarveselvityksessä asetettuja valaistusverkon värilämpötila- ja hierarkiatavoitteita, joiden mukaan tonttikaduilla suositellaan käytettäväksi valkoisen valon valonlähteitä [20].

Elinkaarikustannuslaskelmat osoittivat, että valaistuksen saneeraukset suositellaan toteutettaviksi LED-valaisimilla, vaikka niiden rakennuskustannukset olivatkin valaisimien vaihtojen yhteydessä noin 77 % ja uudisrakentamisessa noin 6 % suuremmat kuin suurpainenatriumlamppuvalaisimien. Toisaalta LED-valaisimien ensimmäisen vuoden hoitokustannukset olivat valaisimien vaihtojen yhteydessä noin 36 % ja uudisrakentamisessa noin 31 % pienemmät. Ne tekevät LEDeistä kokonaistaloudellisimman vaihtoehdon valaisimien vaihdoissa tarkasteluvuoden 15 ja uudisrakentamisessa vuoden 19 lopussa.

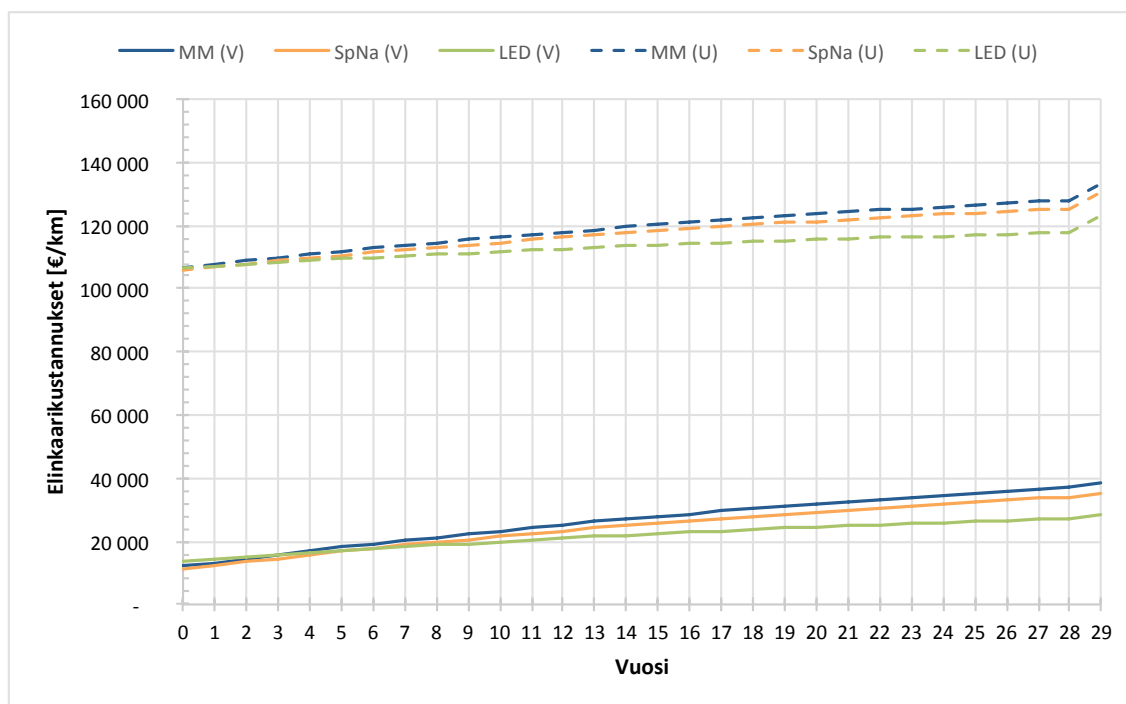


Kuva 16: Monimetallilamppu-, suurpainenatriumlamppu- ja LED-valaisimien vaihdoista (V) ja uudisrakentamisesta (U) aiheutuvat kumulatiiviset elinkaarikustannukset tonttikaduilla.

4.1.4 Kevyen liikenteen väylät, aukiot ja puistot

Kuvassa 17 esitetään kevyen liikenteen väylien, aukoiden ja puistojen valaistuksen saneerauksesta aiheutuvat elinkaarikustannukset, kun joko vain valaisimet vaihdetaan tai koko valaistus uusitaan. Havaitaan, että saneeraukset kannattaa molemmissa tapauksissa toteuttaa LED-valaisimilla, jotka ovat elinkaarikustannuksiltaan kaikkein suotuisin vaihtoehto. Tulokset tukevat Helsingin kaupungin ulkovalaistuksen tarveselvityksessä asetettuja valaistusverkon värilämpötila- ja hierarkiatavoitteita, joiden mukaan kevyen liikenteen väylillä, aukioilla ja puistoissa suositellaan käytettäväksi valkoisen valon valonlähteitä [20].

Elinkaarikustannuslaskelmat osoittivat, että valaistuksen saneeraukset suositellaan toteutettaviksi LED-valaisimilla, vaikka niiden rakennuskustannukset olivatkin valaisimien vaihtojen yhteydessä noin 27 % ja uudisrakentamisessa noin 1 % suuremmat kuin suurpainenatriumlamppuvalaisimien. Toisaalta LED-valaisimien ensimmäisen vuoden hoitokustannukset olivat valaisimien vaihtojen yhteydessä noin 37 % ja uudisrakentamisessa noin 41 % pienemmät. Ne tekevät LEDeistä kokonaistaloudellisimman vaihtoehdon valaisimien vaihdoissa tarkasteluvuoden 6 ja uudisrakentamisessa vuoden 2 lopussa.



Kuva 17: Monimetallilamppu-, suurpainenatriumlamppu- ja LED-valaisimien vaihdoista (V) ja uudisrakentamisesta (U) aiheutuvat kumulatiiviset elinkaarikustannukset kevyen liikenteen väylillä, aukioilla ja puistoissa.

4.2 Kannattavuuslaskelmat

”Helsinki LED” -hankkeen sekä vaihtoehtoisten saneerausohjelmien I ja II taloudellista kannattavuutta tutkittiin nettonykyarvojen, sisäisten korkokantojen ja takaisinmaksuaikojen perusteella. Lisäksi selvitettiin saneerausohjelmien investointikustannukset sekä saneerauksilla saavutettavat ensimmäisen vuoden hoitokustannus-, energia- ja hiilidioksidipäästösäästöt. Kannattavuuslaskelmissa oletettiin, että kaikki yli 30-vuotiaat valaistusratkaisut ovat elinkaarensa päässä ja ne uusitaan kokonaan. Vastaavasti valaisimien vaihtojen oletettiin olevan suositeltavaa, mikäli valaisinpylväät, valaisinvarret, jalustat ja sähkönjakolaitteet ovat hyvässä kunnossa ja niiden jäljellä oleva tekninen elinikä on riittävä. Laskelmat perustuvat luvun 4.1 elinkaarikustannuslaskennassa ratkaistuihin valaistuksen saneerauksesta aiheutuviin tiemetrikustannuksiin. Laskennassa sovelletut menetelmät, yhtälöt sekä parametrit selostetaan yksityiskohtaisemmin luvussa 3.3 ja Excel-laskelmat liitteissä C1–C3.

4.2.1 ”Helsinki LED” -hanke

Taulukossa 3 esitetään ”Helsinki LED” -hankkeen kannattavuuslaskelma, jossa julkisen ulkovalaistusverkon kaikki purkauslamppuvalaisimet saneerataan LED-valaisimilla vuosina 2015–2016. Nähdään, että pääosa saneerauksista, noin 67 300 kappaletta, toteutetaan valaisimien vaihdoilla ja noin 13 600 kappaletta täysin uudella valaistuksella perustuen ulkovalaistusverkon nykytilanteeseen. Lisäksi purkauslampuil-

la toteutetut noin 2 500 sillanalus- ja tunnelivalaisinta korvataan asennustavaltaan vastaavilla LED-valaistusratkaisuilla. Havaitaan, ettei hankkeen toteutettavuutta ja taloudellista kannattavuutta voida perustella nettonykyarvolla eikä takaisinmaksuajalla.

Kannattavuuslaskennassa ratkaistiin ”Helsinki LED” -hankkeen investointikustannuksiksi noin 101,4 miljoonaa euroa sekä ensimmäisen vuoden hoitokustannussäästöiksi noin 3,2 miljoonaa euroa ja energiasäästöiksi noin 27,7 GWh. Lisäksi hankkeen arvioitiin vuosittain säästävän noin 6 012 tonnia hiilidioksidipäästöjä. Hankkeen toteuttaminen ei kuitenkaan ole taloudellisesti kannattavaa lähes -37 miljoonan euron nettonykyarvon ja alle 6 % tuottovaatimuksen jäävän sisäisen korkokannan vuoksi. Takaisinmaksuaikaa ei voitu myöskään määrittää, sillä kumulatiiviset hoitokustannussäästöt eivät kattaneet hankkeen investointikustannuksia työn 30 vuoden tarkasteluajanjakson aikana.

Taulukko 3: ”Helsinki LED” -hankkeen kannattavuuslaskelma, jossa K_0 on investointikustannukset, S_{h1} ensimmäisen vuoden hoitokustannussäästöt, S_e ensimmäisen vuoden energiasäästöt, S_{CO_2} ensimmäisen vuoden hiilidioksidipäästösäästöt, NPV nettonykyarvo ja N_d takaisinmaksuaika.

	Valaisimia [kpl]	K_0 [1 000 €]	S_{h1} [1 000 €]	S_e [GWh]	S_{CO_2} [t]	NPV [1 000 €]	N_d [a]
Valaisimien vaihdot	67 300	37 870	2 464	21,0	4 553		
Uudisrakentaminen	13 600	61 675	710	6,2	1 346		
Sillanalus- ja tunnelivalaisimet	2 500	1 850	65	0,5	114		
Yhteensä	83 400	101 395	3 238	27,7	6 012	-36 992	-

4.2.2 Vaihtoehtoinen saneerausohjelma I

Taulukossa 4 esitetään vaihtoehtoisen saneerausohjelman I kannattavuuslaskelma, jossa julkisen ulkovalaistusverkon kaikki elohopealamppuvalaisimet saneerataan pääosin LED-valaisimilla vuosina 2015–2018. Pääkatujen valaisimien saneeraukset toteutetaan suurpainenatriumlamppuvalaisimilla tämän työn elinkaarikustannuslaskennan mukaisesti. Nähdään, että valtaosa saneerauksista, noin 5 050 kappaletta, toteutetaan täysin uudella valaistuksella ja noin 3 250 kappaletta valaisimien vaihdoilla perustuen ulkovalaistusverkon nykytilanteeseen. Lisäksi elohopealampuilla toteutetut noin 1 700 sillanalus- ja tunnelivalaisinta korvataan asennustavaltaan vastaavilla LED-valaistusratkaisuilla. Havaitaan, ettei saneerausohjelman toteutettavuutta ja taloudellista kannattavuutta voida perustella nettonykyarvolla eikä takaisinmaksuajalla.

Kannattavuuslaskennassa ratkaistiin vaihtoehtoisen saneerausohjelman I investointikustannuksiksi noin 21,2 miljoonaa euroa sekä ensimmäisen vuoden hoitokustannussäästöiksi noin 0,5 miljoonaa euroa ja energiasäästöiksi noin 4,6 GWh. Lisäksi hank-

keen arvioitiin vuosittain säästävän noin 994 tonnia hiilidioksidipäästöjä. Hankkeen toteuttaminen ei kuitenkaan ole taloudellisesti kannattavaa noin -10,9 miljoonan euron nettonykyarvon ja alle 6 % tuottovaatimuksen jäävän sisäisen korkokannan vuoksi. Takaisinmaksuaikaa ei voitu myöskään määrittää, sillä kumulatiiviset hoitokustannussäästöt eivät kattaneet hankkeen investointikustannuksia työn 30 vuoden tarkasteluajanjakson aikana.

Taulukko 4: Vaihtoehtoisen saneerausohjelman I kannattavuuslaskelma, jossa K_0 on investointikustannukset, S_{h1} ensimmäisen vuoden hoitokustannussäästöt, S_e ensimmäisen vuoden energiasäästöt, S_{CO_2} ensimmäisen vuoden hiilidioksidipäästösäästöt, NPV nettonykyarvo ja N_d takaisinmaksuaika.

	Valaisimia [kpl]	K_0 [1 000 €]	S_{h1} [1 000 €]	S_e [GWh]	S_{CO_2} [t]	NPV [1 000 €]	N_d [a]
Valaisimien vaihdot	3 250	1 620	189	1,6	353		
Uudisrakentaminen	5 050	18 283	287	2,5	538		
Sillanalus- ja tunnelivalaisimet	1 700	1 258	57	0,5	104		
Yhteensä	10 000	21 161	533	4,6	994	-10 939	-

4.2.3 Vaihtoehtoinen saneerausohjelma II

Taulukossa 5 esitetään vaihtoehtoisen saneerausohjelman II kannattavuuslaskelma, jossa julkisen ulkovalaistusverkon kaikki elohopealamppuvalaisimet, korvaavat purkauslamppuvalaisimet sekä osa elinkaarensa päässä olevista suurpainenatriumlamppuvalaisimista saneerataan LED-valaisimilla vuosina 2015–2018. Huomataan, että enemmistö saneerauksista, noin 12 300 kappaletta, toteutetaan valaisimien vaihdoilla ja noin 10 400 kappaletta täysin uudella valaistuksella perustuen ulkovalaistusverkon nykytilanteeseen. Lisäksi purkauslampuilla toteutetut noin 2 500 sillanalus- ja tunnelivalaisinta korvataan asennustavaltaan vastaavilla LED-valaistusratkaisuilla. Havaitaan, ettei saneerausohjelman toteutettavuutta ja taloudellista kannattavuutta voida perustella nettonykyarvolla eikä takaisinmaksuajalla.

Kannattavuuslaskennassa ratkaistiin vaihtoehtoisen saneerausohjelman II investointikustannuksiksi noin 50,5 miljoonaa euroa sekä ensimmäisen vuoden hoitokustannussäästöiksi noin 1,1 miljoonaa euroa ja energiasäästöiksi noin 9,8 GWh. Lisäksi hankkeen arvioitiin vuosittain säästävän noin 2 119 tonnia hiilidioksidipäästöjä. Hankkeen toteuttaminen ei kuitenkaan ole taloudellisesti kannattavaa noin -28,6 miljoonan euron nettonykyarvon ja alle 6 % tuottovaatimuksen jäävän sisäisen korkokannan vuoksi. Takaisinmaksuaikaa ei voitu myöskään määrittää, sillä kumulatiiviset hoitokustannussäästöt eivät kattaneet hankkeen investointikustannuksia työn 30 vuoden tarkasteluajanjakson aikana.

Taulukko 5: Vaihtoehtoisen saneerausohjelman II kannattavuuslaskelma, jossa K_0 on investointikustannukset, S_{h1} ensimmäisen vuoden hoitokustannussäästöt, S_e ensimmäisen vuoden energiasäästöt, S_{CO_2} ensimmäisen vuoden hiilidioksidipäästösäästöt, NPV nettonykyarvo ja N_d takaisinmaksuaika.

	Valaisimia [kpl]	K_0 [1 000 €]	S_{h1} [1 000 €]	S_e [GWh]	S_{CO_2} [t]	NPV [1 000 €]	N_d [a]
Valaisimien vaihdot	12 300	6 741	487	4,1	885		
Uudisrakentaminen	10 400	41 938	600	5,2	1 120		
Sillanalus- ja tunnelivalaisimet	2 500	1 850	65	0,5	114		
Yhteensä	25 200	50 529	1 151	9,8	2 119	-28 557	-

4.3 Herkkyysanalyysi

Herkkyysanalyysissä tarkasteltiin, miten työn elinkaarikustannus- ja kannattavuuslaskelmat reagoivat LED-valaisimien hinta H_v -parametrin oletettuihin muutoksiin. Yhtenä tavoitteista oli selvittää, kuinka paljon hintojen tulisi olla edullisempia, että myös pääkatujen LED-valaisimien saneeraukset muuttuisivat elinkaarikustannusten perusteella kokonaistaloudellisesti kannattaviksi. Havaittiin, että hintojen tulisi olla valaisimien vaihtojen yhteydessä noin 23 % ja uudisrakentamisessa jopa 51 % pienemmät.

Tavoitteena oli tutkia myös ”Helsinki LED” -hankkeen taloudellista kannattavuutta, kun LED-valaisimien hinnat ennustettiin 15 % edullisemmiksi. Tämä arvio perustuu olettamukseen, että valaisimista saadaan määräalennusta niiden hankintaerien ollessa melko suuret. Tässä tapauksessa ”Helsinki LED” -hankkeen investointikustannuksiksi ratkaistiin noin 94,5 miljoonaa euroa ja ensimmäisen vuoden hoitokustannussäästöiksi noin 3,3 miljoonaa euroa. Energia- ja hiilidioksidipäästösäästöt pysyivät samoina. Hankkeen toteuttaminen ei kuitenkaan ole taloudellisesti kannattavaa noin -27,9 miljoonan euron nettonykyarvon ja alle 6 % tuottovaatimuksen jäävän sisäisen korkokannan vuoksi. Kumulatiiviset hoitokustannussäästöt eivät myöskään maksa hankkeen investointikustannuksia takaisin työn 30 vuoden tarkasteluajanjakson aikana.

5 Tarkastelu

Tässä luvussa tarkastellaan työn tutkimustulosten merkittävyyttä ja luotettavuutta. Ensiksi johtopäätöksissä arvioidaan elinkaarikustannus- ja kannattavuuslaskelmien mahdollisia haasteita, epävarmuustekijöitä sekä jatkotutkimuskohteita. Lopuksi esitetään vielä yhteenveto ja suositukset työssä käsitellyistä asioista.

5.1 Johtopäätökset

Luvun 4.1 elinkaarikustannuslaskelmat ovat esimerkkejä, joissa tehtiin useita oletuksia esimerkiksi tarkasteltavista valaistusratkaisuista, katupoikkileikkauksista ja LED-valaisimista. Tulokset perustuvat valaistuslaitteiden tyypillisiin ominaisuuksiin sekä Helsingin Energian ajankohtaisiin kustannushintoihin, mutta jatkuvasti kehittyvät valaistusmarkkinat aiheuttavat omat haasteensa ja tekevät laskelmista lyhytaikaisia. Muihin epävarmuustekijöihin lukeutuvat muun muassa valaistuksen ohjauksen toimivuus sekä LED-valaisimien ja -moduulien todellinen hyötypolttoikä. Helsingin kaupungin rakennusvirastolle ja Helsingin Energialle ei myöskään ole vielä kertynyt pitkän ajanjakson kokemuksia LED-valaisimien kunnossapitotarpeista ja -kustannuksista [37]. Toisaalta koko elinkaaren kattavia kokemuksia on tuskin kenelläkään, ja siksi aiheeseen liittyvän tieteellisen tutkimuksen sekä muiden kaupunkien tiedotuksen seuraaminen on suositeltavaa.

Luvussa 4.2 esitetyt kannattavuuslaskelmien säästöt edellyttävät LED-valaisimien ja uuden ohjausjärjestelmän kokonaisvaltaista toimivuutta, mistä ei kuitenkaan ole vielä tarpeeksi kokemusta [26]. ”Helsinki LED” -hanke aiheuttaa myös mittavat valaisimien saneeraukset hyvin lyhyellä aikajänteellä, mikä asettaa merkittäviä resurssihaasteita niin valmistajille, urakoitsijoille, suunnittelijoille kuin tilaajillekin. Ennen hankintojen ja saneerausten käynnistämistä tarvitaan muun muassa perusteelliset valaistuslaitteiden inventoinnit sekä toiminta-, kunnossapito- ja valaistussuunnitelmat. Lisäksi investointitukien, ESCO-hankkeiden tukien sekä valaistuslaitteiden takuuehtojen selvittäminen on suositeltavaa. Huomioitavaa on myös, että julkisista ulkovalaisimista lähes puolet on otettu käyttöön vuosina 2005-2014, eikä niiden uusiminen ole kokonaistaloudellisesti kannattavaa. Yleisesti jatkotutkimusta vaaditaan laskelmien ulkopuolelle jäävistä tekijöistä, kuten LEDien mahdollisista vaikutuksista sähkön laatuun, ympäristöön, ihmisiin ja eläimiin.

Helsingin kaupungin julkisen ulkovalaistuksen on ensisijaisesti mahdollistettava näkeminen, ja siksi kaikkien valaistusratkaisujen tulee täyttää niille asetetut valaistustekniset vaatimukset. Vasta sitten voidaan hankkeita vertailla esimerkiksi kokonaistaloudellisuuden, energiatehokkuuden, ympäristöystävällisyyden tai esteettisyyden perusteella. Tämän työn tulokset eivät korvaa hankekohtaisia tarkasteluja, mutta ne osoittavat, ettei tällä hetkellä ole olemassa yhtä ylivertaista ulkovalaistuksen valonlähdettä. Useimmiten energiapoliittiset tavoitteet kuitenkin ohjaavat julkisia hankintoja, ja siten myös Helsingin kaupungin julkista ulkovalaistusta.

5.2 Yhteenveto ja suositukset

Helsingin kaupunginhallitus [1] perusti vuoden 2014 talousarvioneuvotteluissaan ”Helsinki LED” -hankkeen, jossa ehdotetaan kaikkien julkisten tilojen valaisimien korvaamista energiatehokkailla LED-valaistusratkaisuilla vuoden 2016 loppuun mennessä. Tällä tavoitellaan kaupungin juoksevien kulujen vähentämistä, energiasäästöjä sekä kaupunkitilan viihtyvyyden parantamista [1]. Hanke koskettaa myös kaupungin julkisen ulkovalaistuksen noin 83 400 purkauslamppuvalaisinta, joista Helsingin Energia valmisteli suosituksensa kaupunginhallitukselle vuoden 2014 syksyllä.

Tässä diplomityössä tarkasteltiin, onko julkisen ulkovalaistuksen saneeraus LEDeillä tällä hetkellä kokonaistaloudellisesti kannattavaa. Yhtenä työn tavoitteista oli selvittää ”Helsinki LED” -hankkeelle mahdollisimman tarkka kustannusarvio ja takaisinmaksuaika. Tavoitteena oli pohtia myös vaihtoehtoisia saneerausohjelmia ja vertailla, ovatko ne nettonykyarvoiltaan, takaisinmaksuajoiltaan ja aikatauluiltaan kannattavampia. Lisäksi tarkoituksena oli tutkia Helsingin kaupungin julkisen ulkovalaistuksen nykytilaa ja energiatehokkuutta, sekä lyhyesti muutamien muiden kaupunkien LED-saneeraushankkeita.

Tutkimusaiheen havaittiin olevan erittäin ajankohtainen, sillä esimerkiksi New Yorkissa, Los Angelesissa, Milanossa ja Vilnassa on jo siirrytty tai päätetty siirtyä lähes kokonaan LED-ulkovalaistukseen [2, 3, 4, 5]. Tähän ovat vaikuttaneet muun muassa LED-valaisimien viimeaikainen tuotekehitys, hintojen lasku ja valotehokkuuden parantuminen [6]. Kaupungit ovat myös todenneet ja arvioineet, että toimenpiteillä saavutetaan merkittäviä hoitokustannus-, energia- ja hiilidioksidipäästösäästöjä.

Helsingin kaupungin julkinen ulkovalaistusverkko käsitti vuoden 2014 toukokuussa 84 365 valaisinta, joista vain noin 1,1 % oli LED-valaisimia. Verkon vuosittaiseksi sähkönkulutukseksi arvioitiin noin 49,1 GWh, joka vastasi noin 3 %:a kaupungin oman toiminnan energiankulutuksesta ja 5 %:a hiilidioksidipäästöistä. Kokonaiskulutuksen havaittiin vähentyneen noin 25 % ja valaisinkohtaisen kulutuksen noin 37 % vuosina 1997–2014, vaikka valaisimien lukumäärä on samanaikaisesti lisääntynyt noin 19 %. Lisäksi jo nyt tehdyillä toimenpiteillä ylitetään kunta-alan energiatehokkuussopimuksen 9 %:n säästötavoite ulkovalaistuksessa selvästi.

Työn elinkaarikustannuslaskelmat osoittivat, että uudisrakentaminen ja elinkaarensa päässä olevan julkisen ulkovalaistuksen saneeraus LED-valaisimilla on kokonaistaloudellisesti kannattavaa kokooja- ja tonttikaduilla sekä kevyen liikenteen väylillä, aukioilla ja puistoissa. Pääkaduilla ovat suurpainenatriumlamppuvalaisimet yhä kustannustehokkaimpia, mutta tämän odotetaan muuttuvan tulevaisuudessa LEDien tuote- ja hintakehityksen jatkuessa. Tutkimustulosten havaittiin myös pääasiassa tukevan Helsingin kaupungin ulkovalaistuksen tarveselvityksessä asetettuja valaistusverkon värilämpötila- ja hierarkiatavoitteita [20].

Taulukosta 6 nähdään, että kannattavuuslaskennassa ratkaistiin ”Helsinki LED” -hankkeen investointikustannuksiksi noin 101,4 miljoonaa euroa sekä ensimmäisen vuoden hoitokustannussäästöiksi noin 3,2 miljoonaa euroa ja energiasäästöiksi noin 27,7 GWh. Lisäksi havaitaan, ettei hankkeen toteuttaminen ole taloudellisesti kannattavaa lähes -37 miljoonan euron nettonykyarvon ja määrittelemättömän eli työn 30 vuoden tarkasteluaajanjakson ylittävän takaisinmaksuajan vuoksi. Myöskään vaihtoehtoisten saneerausohjelmien toteutettavuutta ja taloudellista kannattavuutta ei voida perustella näillä tunnusluvuilla, vaikka sähköverkon kustannuksissa huomioitiin yhteistyö kaupungin muiden rakentajien kanssa. Jos LEDeillä halutaan kuitenkin vaikuttaa esimerkiksi kaupungin imagoon, energiatehokkuuteen tai hiilidioksidipäästöihin, suositellaan kustannuksiltaan ja aikataulultaan suotuisampaa vaihtoehtoista saneerausohjelmaa I. Ohjelma sisältää julkisen ulkovalaistusverkon kaikki elohopealamppuvalaisimet.

Taulukko 6: Kannattavuuslaskelmat, joissa K_0 on investointikustannukset, S_{h1} ensimmäisen vuoden hoitokustannussäästöt, S_e ensimmäisen vuoden energiasäästöt, S_{CO_2} ensimmäisen vuoden hiilidioksidipäästösäästöt, NPV nettonykyarvo ja N_d takaisinmaksuaika.

	Valaisimia [kpl]	K_0 [1 000 €]	S_{h1} [1 000 €]	S_e [GWh]	S_{CO_2} [t]	NPV [1 000 €]	N_d [a]
Vaihtoehtoinen saneerausohjelma I (2015–2018)	10 000	21 161	533	4,6	994	-10 939	-
Vaihtoehtoinen saneerausohjelma II (2015–2018)	25 200	50 529	1 151	9,8	2 119	-28 557	-
”Helsinki LED” -hanke (2015–2016)	83 400	101 395	3 238	27,7	6 012	-36 992	-

Viitteet

- [1] Helsingin kaupunginvaltuusto. Talousarvio 2014 ja taloussuunnitelma 2014–2016. Verkkodokumentti. Päivitetty 13.11.2013. Viitattu 28.7.2014. Saatavissa: http://www.hel.fi/static/taske/julkaisut/2013/HKI_TA_2014_web.pdf.
- [2] Government of New York City. All 250,000 NYC Street Lights Will Be Replaced with Energy-Efficient LEDs by 2017. Verkkodokumentti. Päivitetty 24.10.2013. Viitattu 21.9.2014. Saatavissa: <http://www.mikebloomberg.com/index.cfm?objectid=EB45C738-C29C-7CA2-FCE918E4F3D2DCC2>.
- [3] Office of the Mayor of Los Angeles. Mayor Villaraigosa Announces Completion of Largest LED Street Light Replacement Program. Verkkodokumentti. Päivitetty 18.6.2013. Viitattu 5.8.2014. Saatavissa: <http://bsl.lacity.org/downloads/news/LEDPRESSRelease061813.pdf>.
- [4] AEC Illuminazione S.r.l. AEC Lights up Milan for the Expo 2015. Verkkodokumentti. Päivitetty 9.5.2014. Viitattu 4.8.2014. Saatavissa: http://www.aecilluminazione.com/uploads/kcFinder/files/AEC_LightsUp_Milan_PRESS.pdf.
- [5] Juskenaitė, I. Vilnius Upgrades Entire Lighting System in Region's First PPP of This Type. Verkkodokumentti. Päivitetty 16.4.2014. Viitattu 4.8.2014. Saatavissa: <http://www.vilnius.lt/eng/IMG/11382/26879>.
- [6] U.S. Department of Energy. Solid-State Lighting Research and Development: Multi-Year Program Plan. Verkkodokumentti. Päivitetty 5/2014. Viitattu 28.7.2014. Saatavissa: http://apps1.eere.energy.gov/buildings/publications/pdfs/ssl/ssl_mypp2014_web.pdf.
- [7] Euroopan parlamentti ja Euroopan unionin neuvosto. Direktiivi 2011/65/EU. Verkkodokumentti. Päivitetty 1.7.2011. Viitattu 1.8.2014. Saatavissa: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/PDF/?uri=CELEX:32011L0065&qid=1406886602821&from=FI>.
- [8] Euroopan parlamentti ja Euroopan unionin neuvosto. Direktiivi 2009/125/EY. Verkkodokumentti. Päivitetty 31.10.2009. Viitattu 28.7.2014. Saatavissa: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/PDF/?uri=CELEX:32009L0125&qid=1406534853005&from=FI>.
- [9] Euroopan yhteisöjen komissio. Asetus (EY) N:o 245/2009. Verkkodokumentti. Päivitetty 24.3.2009. Viitattu 28.7.2014. Saatavissa: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/PDF/?uri=CELEX:32009R0245&qid=1406534890132&from=FI>.
- [10] Euroopan komissio. Asetus (EU) N:o 347/2010. Verkkodokumentti. Päivitetty 24.4.2010. Viitattu 28.7.2014. Saatavissa: <http://eur-lex>.

europa.eu/legal-content/FI/TXT/PDF/?uri=CELEX:32010R0347&qid=1406534918648&from=FI.

- [11] Halonen, L., Tetri, E. ja Bhusal, P. *Guidebook on Energy Efficient Electric Lighting for Buildings: Summary Report*. Espoo, Aalto University School of Science and Technology, 2010.
- [12] Euroopan komissio. Asetus (EU) N:o 874/2012. Verkkodokumentti. Päivitetty 26.9.2012. Viitattu 13.9.2014. Saatavissa: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/PDF/?uri=CELEX:32012R0874&qid=1410621744933&from=FI>.
- [13] European Commission's Directorate-General for Energy. Working Document on Possible Measures Targeting the Energy Efficiency of Lighting in the Tertiary Sector. Verkkodokumentti. Päivitetty 5.7.2010. Viitattu 21.9.2014. Saatavissa: http://www.valosto.com/tiedostot/WD_Lighting_2_CF_final.pdf.
- [14] VITO. Final Report Lot 9: Public Street Lighting. Verkkodokumentti. Päivitetty 1/2007. Viitattu 21.9.2014. Saatavissa: <http://www.eup4light.net/assets/pdffiles/Final/VIT0EuPStreetLightingFinal.pdf>.
- [15] Gregory, K. City to Fit All Streetlights with Energy-Saving LED Bulbs. Verkkodokumentti. Päivitetty 24.10.2013. Viitattu 21.9.2014. Saatavissa: http://www.nytimes.com/2013/10/25/nyregion/city-to-fit-all-streetlights-with-energy-saving-led-bulbs.html?_r=0.
- [16] Turun kaupunki. Loput Turun elohopeahöyryvalaisimista vaihdetaan led-valaisimiin. Verkkodokumentti. Päivitetty 24.6.2014. Viitattu 21.9.2014. Saatavissa: <https://www.turku.fi/public/default.aspx?contentid=520400&nodeid=23>.
- [17] Halonen, L. ja Lehtovaara, J. *Valaistustekniikka*. Espoo, Otatieto, 1992.
- [18] Tiehallinto. Tievalaistuksen suunnittelu. Verkkodokumentti. Päivitetty 24.4.2006. Viitattu 22.9.2014. Saatavissa: http://alk.tiehallinto.fi/thohje/pdf/2100034-v-06tievalaist_suunn.pdf.
- [19] DiLaura, D.L. et al. *The Lighting Handbook: Reference and Application*. 10. painos. New York, Illuminating Engineering Society of North America, 2011.
- [20] Sito Oy. Helsingin kaupungin ulkovalaistuksen tarveselvitys. Verkkodokumentti. Päivitetty 18.6.2014. Viitattu 9.10.2014. Saatavissa: Julkaisematon.
- [21] Puolakka, M. et al. *LEDit ja aurinkosähkö – Energiatehokas ja kestävä valaistus*. Espoo, Aalto-yliopiston sähkötekniikan korkeakoulu, 2012.

- [22] Motiva Oy. Elohopealamput poistuvat markkinoilta 2015 – Mitä tilalle katuvalaistukseen?. Verkkodokumentti. Päivitetty 2/2014. Viitattu 19.10.2014. Saatavissa: http://www.motiva.fi/files/8729/Katuvalalaisuesite_10032014.pdf
- [23] Aalto, L. ja Pilkkakangas, K. *Kaupunkikuva: 100 vuotta energiarakentamista Helsingissä*. Helsinki, Helsingin Energia, 2008.
- [24] Helsingin kaupungin rakennusvirasto. Toimintasuunnitelma 2014. Verkkodokumentti. Päivitetty 3.12.2013. Viitattu 21.9.2014. Saatavissa: http://www.hel.fi/static/hkr/julkaisut/2014/tosu_2014.pdf.
- [25] Motiva Oy. Helsingin Energia – Helsingissä katuvalaistus siirtyy älyaikaan. Verkkodokumentti. Päivitetty 9/2013. Viitattu 21.9.2014. Saatavissa: http://www.motiva.fi/files/7984/Helsingin_Energia_Helsingissa_katuvalaistus_siirtyy_alyaikaan.pdf
- [26] Markkanen, O. Yksikön päällikkö. Helsingin Energia. Sahamylyntie 4, 00090 HELEN. Haastattelut 2.6.–11.9.2014.
- [27] Pohjola, T. Kehityspäällikkö. Helsingin Energia. Sahamylyntie 4, 00090 HELEN. Haastattelut 2.6.–10.12.2014.
- [28] SFS-EN 13201-2. Road Lighting – Part 2: Performance Requirements. Helsinki, Suomen Standardisoimisliitto, 2004. 16 s.
- [29] SFS-EN 13201-3. Road Lighting – Part 3: Calculation of Performance. Helsinki, Suomen Standardisoimisliitto, 2004. 45 s.
- [30] SFS-EN 13201-4. Road Lighting – Part 4: Methods of Measuring Lighting Performance. Helsinki, Suomen Standardisoimisliitto, 2004. 14 s.
- [31] CEN/TR 13201-1. Road Lighting – Part 1: Selection of Lighting Classes. Helsinki, Suomen Standardisoimisliitto, 2004. 29 s.
- [32] Ekrias, A. Tekniikan tohtori. LiCon-AT Oy. Olarinluoma 7, 02200 Espoo. Haastattelut 6.6.–11.9.2014.
- [33] Energiansäästöneuvottelukunta. Energiansäästötoiminta ja energiankäytön kehittyminen Helsingin kaupungissa 2013. Verkkodokumentti. Päivitetty 10.6.2014. Viitattu 21.9.2014. Saatavissa: <http://www.energiatehokashelsinki.fi/tiedostot/esnk-n-raportit/esnk-raportti-2013.pdf>.
- [34] Helsingin kaupungin kaupunkisuunnitteluvirasto. Katupoikkileikkausten suunnitteluohjeet. Verkkodokumentti. Päivitetty 2.11.2001. Viitattu 4.11.2014. Saatavissa: <http://www.hel.fi/hel2/ksv/Aineistot/Liikennesuunnittelu/Autoilu/katu1.pdf>.

- [35] Liikennevirasto. Maantie- ja rautatiealueiden valaistuksen suunnittelu. Verkkodokumentti. Päivitetty 18.6.2014. Viitattu 22.9.2014. Saatavissa: **Julkaisematon**.
- [36] Tammilehto, A. Tuotepäällikkö. Helsingin Energia. Sahamylyntie 4, 00090 HELEN. Haastattelut 18.6.–11.9.2014.
- [37] Karjalainen, T. Kunnossapitopäällikkö. Helsingin Energia. Sahamylyntie 4, 00090 HELEN. Haastattelu 28.7.2014.
- [38] Kivi, J. Rakennuttaja. Helsingin Energia. Sahamylyntie 4, 00090 HELEN. Haastattelu 27.6.2014.
- [39] Horngren, C.T., Datar, S.M. ja Rajan, M.V. *Cost Accounting: A Managerial Emphasis*. 14. painos. Harlow, Pearson Education Limited, 2012.
- [40] Helsingin Energia. Energian alkuperä. Verkkodokumentti. Viitattu 6.12.2014. Saatavissa: <https://www.helen.fi/Kotitalouksille/Neuvoa-ja-tietoa/Energia-ja-ymparisto/Energiantuotanto/Energian-alkupera/>.

A Helsingin kaupungin julkinen ulkovalaistus

Liitteessä A1 esitetään Helsingin kaupungin julkiset ulkovalaisimet valonlähteiden, lampputehojen ja valaisimien käyttöönottovuosien mukaan. Havaitaan, että vuoden 2014 toukokuussa ulkovalaistusverkko sisälsi 84 365 valaisinta, joista noin 69,3 % oli suurpainenatriumlamppuvalaisimia, 16,4 % elohopealamppuvalaisimia, 10,9 % monimetallilamppuvalaisimia, 1,1 % LED-valaisimia, 0,9 % induktiolamppuvalaisimia, 0,9 % loistelamppuvalaisimia ja 0,5 % ksenonvalaisimia. Verkon vuosittaiseksi sähkönkulutukseksi arvioitiin noin 49,1 GWh (5 400 000 €), joka vastasi noin 3 %:a kaupungin oman toiminnan energiankulutuksesta ja 5 %:a hiilidioksidipäästöistä.

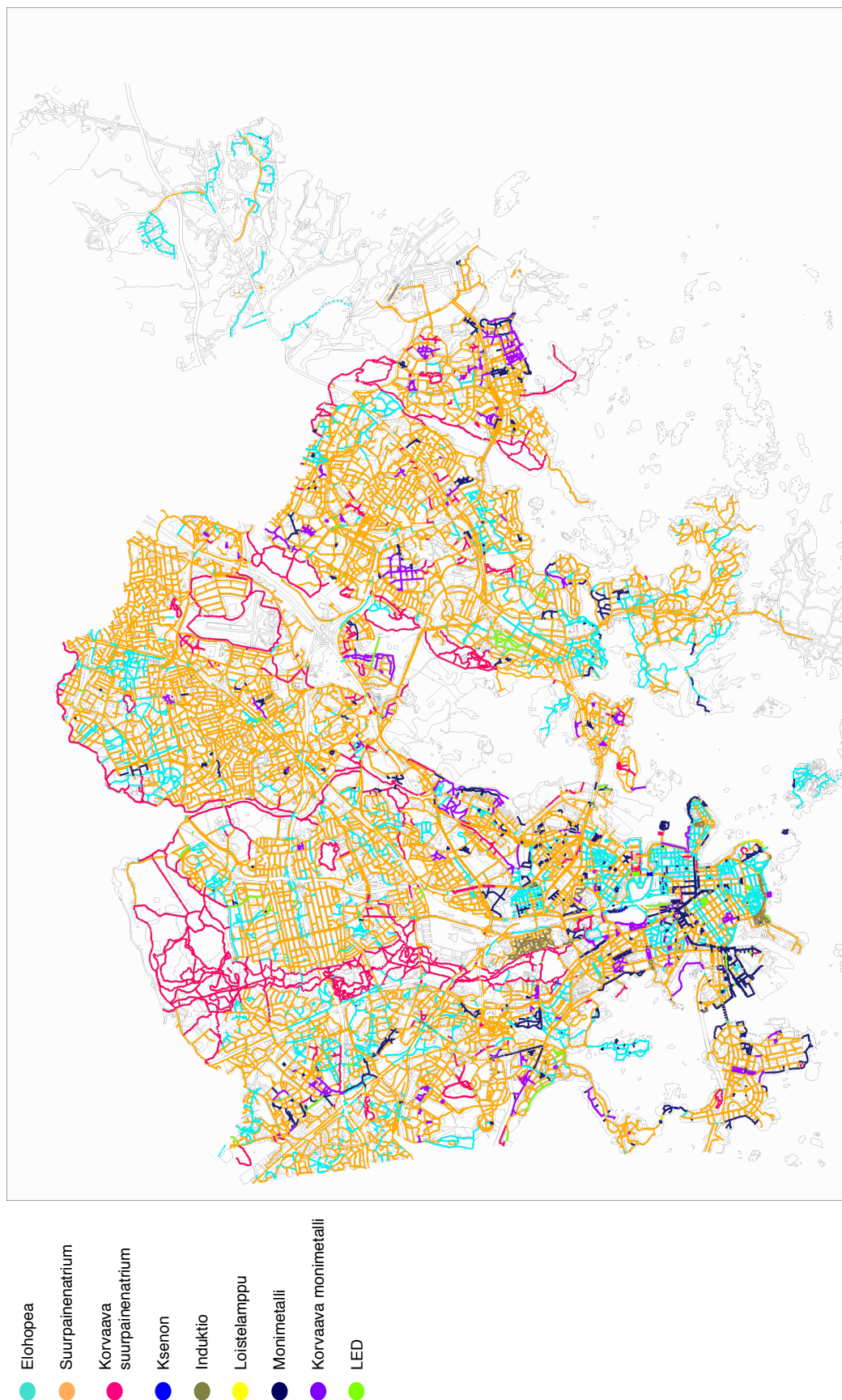
Liitteen A1 ensimmäiseen laskentasarakkeeseen yhdistettiin kaikki ennen vuotta 1984 asennetut valaisimet sekä verkkotietojärjestelmän virheelliset tiedot, sillä tavallisesti tie- ja katuvalaistukselle asetetaan 30 vuoden tekninen elinikä [18]. Havaitaan, että kaikista valaisimista tähän ryhmään kuuluu noin 18 % ja uudempiin asennuksiin noin 82 %. Lisäksi huomataan, että valaisimista lähes puolet on otettu käyttöön vuosina 2005–2014. Tässä työssä oletettiin, että kaikkien valaisinpylväiden, kaapelien ja johtojen asennusvuodet vastaavat valaisimien käyttöönottovuotta.

Tutkimustuloksista laadittiin myös liitteet A2 ja A3, joissa valaisimien sijainnit esitetään kaupungin kartalla valonlähteittäin ja käyttöönottovuosittain. Suurpainenatriumlamppujen nähdään selkeästi olevan käytetyin julkisen ulkovalaistuksen valonlähde. Myös perinteisiä elohopealamppuvalaisimia on vielä laajasti käytössä eri puolilla Helsinkiä, ja erityisesti kantakaupungissa sijaitsee useita iäkkäitä elohopealampuilla varustettuja ripustusvalaisimia. Lisäksi huomataan, että korvaavia suurpainenatriumlamppuvalaisimia käytetään kattavasti Helsingin ulkoilureiteillä, lenkkipoluilla ja laduilla. Vastaavasti induktiolamppuvalaisimia sijaitsee pääasiassa vain Länsi-Pasilassa ja muutamissa puistoissa. Kaiken kaikkiaan havaitaan monimetallilamppujen ja LEDien yleistyneen viime vuosina Helsingin kaupungin julkisessa ulkovalaistuksessa.

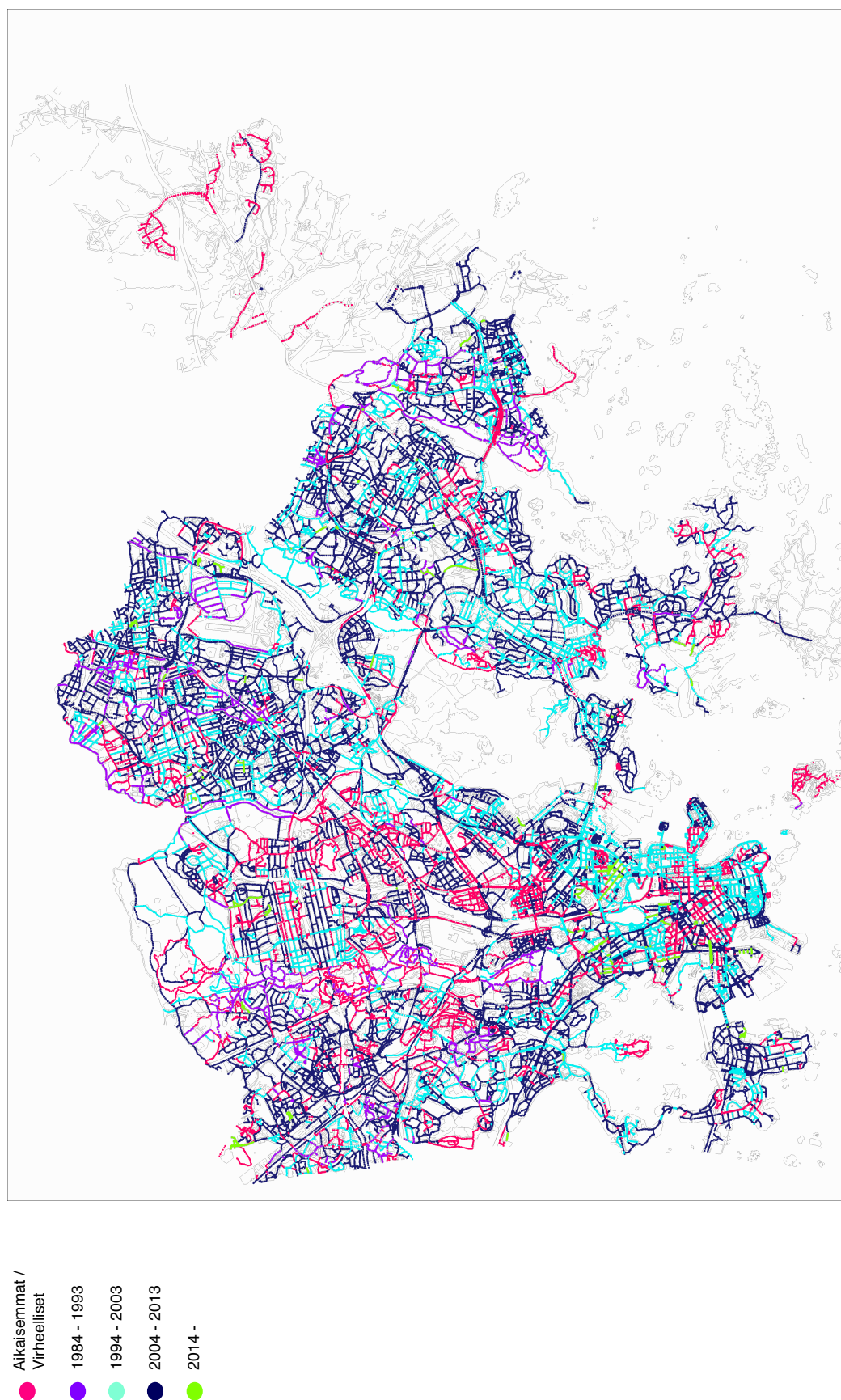
Työtä tehdessä kohdattiin haasteita muun muassa virheellisissä käyttöönottovuosissa sekä dokumentoimattomissa sillanalus- ja tunnelivalaisimissa. Havaittiin myös, että Trimble NIS -verkkotietojärjestelmässä on LED-valaisimille tällä hetkellä vain yksi piirrosmerkki, jonka asettamat rajoitteet korostuvat entisestään LEDien yleistyessä. Lisäksi tulevaisuudessa voisi tutkia esimerkiksi ripustus-, sillanalus- ja tunnelivalaisimien luokittelun toteuttamista sekä katu- ja valaistuluokkien verkkotietojärjestelmään viemistä, joilla helpotettaisiin merkittävästi erilaisten selvitysten ja tilastointien tekemistä.

30.05.2014	Alkaiemmat/ Virheelliset	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014		
		98	11	12	6	1	2	1	2	2	2	2	54	2	13	-	4	-	-	-	-	-	-	4	-	-	-	-	-	-	-	-	188	
Ei hopea	400 W	940	-	12	6	1	2	1	4	2	4	8	369	54	411	-	18	200	30	1	-	1	14	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2 092
	250 W	4 735	39	98	73	104	85	60	79	149	234	182	276	825	307	1 049	210	116	161	279	297	272	283	122	102	141	24	12	3	5	1	-	3	10 266
	125 W	147	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2	3	74	17	117	48	-	35	68	22	26	195	40	40	-	-	-	-	-	-	-	836
	80 W	17	-	-	-	-	-	-	-	-	-	61	26	-	-	-	57	40	16	12	-	6	19	-	-	7	1	4	-	-	-	-	-	266
50 W	5 937	50	116	79	105	87	60	81	155	238	186	347	1 276	366	1 547	227	412	449	325	345	340	312	181	301	181	71	13	10	5	3	-	-	3	13 008
	600 W	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	35
	400 W	276	6	-	1	10	9	-	-	-	-	10	26	76	104	238	66	1	6	2	149	141	41	67	74	-	35	-	-	-	-	-	-	1 383
	250 W	2 419	8	55	51	24	60	69	126	122	123	79	210	1 027	351	870	99	348	86	436	238	362	417	423	380	218	556	410	255	121	6	-	-	10 103
Suurpainenahtium	150 W	1 622	4	42	53	16	17	8	57	49	102	57	193	294	392	695	203	129	67	166	311	394	479	467	419	451	508	1 005	890	1 164	471	72	13	10 592
	100 W	1 497	36	2	-	8	-	29	-	27	38	56	325	338	473	530	258	209	82	309	582	389	403	592	580	574	646	1 737	1 091	2 020	556	423	122	13 932
	70 W	411	-	1	-	-	6	-	-	-	-	-	1	35	2	2	26	-	8	205	164	246	261	313	246	500	2 183	1 227	1 969	573	449	107	-	8 937
	50 W	14	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6	2	1	-	-	-	-	12	3	-	-	43	224	523	1 533	1 875	1 986	107	-	6 239
Korvaava suurpainenahtium	6 239	54	99	105	49	87	121	183	198	263	202	755	1 770	1 328	2 337	629	713	241	921	1 485	1 450	1 598	1 813	1 766	1 489	2 941	5 580	3 986	6 813	3 550	3 278	468	-	51 911
	350 W	104	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	14	-	-	93	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	231	
	220 W	2	-	-	-	-	-	4	-	-	-	-	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	57	
	210 W	14	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	14	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	37	
Korvaava suurpainenahtium	115 W	1 601	149	304	88	292	129	122	150	91	42	121	30	141	81	237	37	157	11	277	46	53	-	97	44	1	-	3	-	144	7	-	-	4 455
	110 W	48	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	13	-	-	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	64
	75 W	246	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	14	29	11	9	14	7	33	158	353	239	11	96	152	135	46	109	38	-	-	-	-	1 711
	2 015	150	304	88	292	129	122	164	91	42	121	30	184	110	338	46	171	18	310	209	406	239	108	140	153	135	49	109	255	7	-	-	-	6 555
Ikenen	8,5 W	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	328	-	-	-	-	-	-	-	66	-	-	-	-	-	-	-	394	
	5 W	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10	
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Induktio	85 W	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	55 W	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Loistelamppu	20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	58 W	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	36 W	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
18 W	46	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	58 W	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	36 W	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
18 W	46	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	58 W	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	36 W	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
18 W	46	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	58 W	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	36 W	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
18 W	46	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	58 W	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	36 W	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
18 W	46	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	58 W	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	36 W	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
18 W	46	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	58 W	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	36 W	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
18 W	46	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	58 W	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	36 W	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
18 W	46	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	58 W	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	36 W	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
18 W	46	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	58 W	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	36 W	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
18 W	46	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	58 W	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	36 W	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
18 W	46	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	58 W																																	

Kuva A1: Helsingin kaupungin julkinen ulkovalaistusverkko (5/2014).



Kuva A2: Helsingin kaupungin julkinen ulkovalaistusverkko valonlähteittäin (7/2014).



Kuva A3: Helsingin kaupungin julkinen ulkovalaistusverkko käyttöönottovuosittain (7/2014).

B Elinkaarikustannuslaskelmat

Helsingin kaupungin julkisen ulkovalaistuksen saneerausta tutkittiin sekä valaisimien vaihdoilla että uudisrakentamisella, ja tarkasteltavina valaistusratkaisuina olivat monimetallilamppu-, suurpainenatriumlamppu- ja LED-valaisimet. Liitteissä B1 ja B2 esitetään saneerauksista aiheutuvat elinkaarikustannukset, jotka koostuvat rakennus- ja hoitokustannuksista sekä jäännösarvoista. Laskelmien lähtökohtina toimivat tyypillisimmät valaistusratkaisut ja katupoikkileikkaukset, jotka perustuvat julkisen ulkovalaistuksen nykytilanteeseen ja energiatehokkuusohjelmaan sekä Helsingin kaupungin ulkovalaistuksen tarveselvitykseen.

Liitteessä B1 esitetään valaisimien vaihdoista aiheutuvat elinkaarikustannukset. Havaitaan, että elinkaarikustannuslaskelmien mukaan on elinkaarensa päässä olevan julkisen ulkovalaistuksen saneeraus LED-valaisimilla kannattavaa kokooja- ja tonttikaduilla sekä kevyen liikenteen väylillä, aukioilla ja puistoissa. Pääkaduilla ovat suurpainenatriumlamppuvalaisimet yhä kustannustehokkaimpia.

Liitteessä B2 esitetään uudisrakentamisesta aiheutuvat elinkaarikustannukset. Havaitaan, että elinkaarikustannuslaskelmien mukaan on julkisen ulkovalaistuksen uudisrakentaminen LED-valaisimilla kannattavaa kokooja- ja tonttikaduilla sekä kevyen liikenteen väylillä, aukioilla ja puistoissa. Pääkaduilla ovat suurpainenatriumlamppuvalaisimet yhä kustannustehokkaimpia. Uudisrakentamisen yhteydessä suoritettavat valaistusteknilliset mitoituslaskelmat näkyvät muuttuneissa valaisinpylväsväleissä ja valaisimien tehoissa [32].

Liitteessä B3 esitetään ulkovalaistuksen ohjausperiaatteet ja tehotasot, jotka vaikuttavat elinkaarikustannuslaskelmien vuosittaisiin energiakustannuksiin. Oletettiin, että LED-valaisimia himmennetään vuoden jokaisena päivänä aikavälillä 23:00–07:00, kun taas monimetalli- ja suurpainenatriumlamppuja välillä 00:00–06:00. Vuotuinen polttoaika t_1 ja vuosittaiset himmennysajat ratkaistiin Helsingin julkisen ulkovalaistusverkon syttymis- ja sammumistilastoista. Vuotuiseksi polttoajaksi saatiin 4 000 tuntia, LED-valaisimien himmennysajaksi 2 500 tuntia sekä monimetalli- ja suurpainenatriumlamppuvalaisimien himmennysajoiksi 1 960 tuntia.

Elinkaarikustannuslaskelmissa eniten haasteita tuottivat muun muassa hyvin monien yksikkö-, asennustyö- ja huoltotyöhintojen selvittäminen sekä LED-valaisimien tuote- ja hintakehityksen ennustaminen. Jatkotutkimusta voisi suorittaa esimerkiksi LED-valaistuksen ohjauksesta ja sen toimivuudesta, mistä ei ole vielä tarpeeksi kokemuseräistä tietoa. Työssä luotua Excel-laskelmaa voidaan vastaisuudessa käyttää työkaluna valaistusratkaisujen elinkaarikustannusvertailuissa.

[illegible]

Kritični podaci potrebni za izradu projekata na području zaštite od požara									
Naziv objekta	Klasa objekta	N _{br}	N _{br}	N _{br}	N _{br}	N _{br}	N _{br}	N _{br}	N _{br}
Proizvodnja									
Europski (120 W)	330	450	0,370	40	2	4%	1		
Europski (150 W)	330	900	0,370	40	2	4%	1		
Skupina (120 W)	330	900	0,370	40	2	4%	1		
Skupina (150 W)	330	900	0,370	40	2	4%	1		
Skupina (180 W)	330	900	0,370	40	2	4%	1		
Posredništvo									
Europski (120 W)	330	450	0,370	35	1	4%	1		
Europski (150 W)	330	900	0,370	35	1	4%	1		
Skupina (120 W)	330	900	0,370	35	1	4%	1		
Skupina (150 W)	330	900	0,370	35	1	4%	1		
Skupina (180 W)	330	900	0,370	35	1	4%	1		
Posredništvo									
Europski (120 W)	330	450	0,370	35	1	4%	1		
Europski (150 W)	330	900	0,370	35	1	4%	1		
Skupina (120 W)	330	900	0,370	35	1	4%	1		
Skupina (150 W)	330	900	0,370	35	1	4%	1		
Skupina (180 W)	330	900	0,370	35	1	4%	1		

H_0 [K/Mpc]	0.11
t_i [yr]	4 000
ζ [Gyr/yr]	2.75

ρ	6 %
δ_s	3 %
δ_{ν}	3 %
J	25 %
k_c	1.15

	t_g [s]	H_1 [$^{\circ}\text{C}/\text{s}$]	H_2 [$^{\circ}\text{C}/\text{s}$]
Ethiopia	4	15	40
Monimetalli	4	30	55
Suipainetrium	6	25	50
LED	30		

M_{iv} [€/m]
Käsiut
KLV2, aukiot ja puistot
85
70

A_i	90 %
Vaihtoehto (X % myk. vaihtoehtoista)	40 %
Puhdistus X vuoden välein	5
Puhdistus työ [€/kg]	10
Teho ryhmävalinnoin jätteen (X % alkuperäisestä)	80 %
Ryhmävalintayö [€/kg]	50
Puhdistuskustannukset [€/30 a]	40

	M_{J10} [Cep]	M_{J100} [Cep]
Pääsuut	450	
Kokokopysuut	346	150
Tonttisuu	306	
KLV:t, aukiot ja puutot	218	

	form polistirena	Hemimerydant [Hd]	Hemimerydant [Hd]	Hemimerydant [Hd]
MM & Spk (2020-04-03)		2 040	1 960	6
LED (2130-07-03)		1 900	2 500	8

	Hemimerydant [Hd]
MM & Spk	
350W → 100W	0,116
100W → 70W	0,084

[illegible][illegible]



LED-valaisimet himmennetään valaistusluokkien avulla 2-portaisella ohjaustavalla alla olevien kellonaikojen ja valaistustasojen mukaan.

Valaistusluokat on esitetty julkaisussa "Helsingin kaupungin ulkovalaistuksen tarveselvitys 2014"

	Kellonaika, alkava tunti																Muuttuvan valaistuksen valaistusluokat			
	15	16	17	18	19	20	21	22	23	00	01	02	03	04	05	06		07	08	09
	Himmennys, jäljelle jäävä valaistustaso prosentteinä																			
Valaistusluokka																				
M1 (AL1)	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	75	50	50	50	75	100	100	100	M1 – M2 – M3 – M2 – M1	
M2 (AL2)	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	70	50	50	50	70	100	100	100	M2 – M3 – M4 – M3 – M2	
M3a (AL3)	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	75	75	50	50	75	75	100	100	M3 – M4 – M5 – M4 – M3	
M3b (AL4a)	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	75	75	50	50	75	75	100	100	M3 – M4 – M5 – M4 – M3	
M4 (AL4b)	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	70	40	40	40	70	70	100	100	M4 – M5 – M6 – M5 – M4	
M5 (AL5)	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	60	40	40	40	60	60	100	100	M5 – M6 – P5 – M6 – M5	
M6	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	50	50	50	50	50	50	100	100	M6 – P6 – M6	
P1 (K1)	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	75	50	50	50	75	100	100	100	P1 – P2 – P3 – P2 – P1	
P2 (K2)	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	70	50	50	50	70	100	100	100	P2 – P3 – P4 – P3 – P2	
P3 (K3)	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	70	40	40	40	70	70	100	100	P3 – P4 – P5 – P4 – P3	
P4 (K4)	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	60	40	40	40	60	60	100	100	P4 – P5 – P6 – P5 – P4	

Purkauslamppuvalaisimien himmennys toteutetaan kaikissa valaistusluokissa klo 00-06.
Purkauslamppuvalaisimien ohjaus toteutetaan 1-portaisena kaksitehokuristimin ja relein pudottamalla suoraan kaksi valaistusluokkaa, esim. 400/250W, 250/150W, 150/100W ja 70/50W, jolloin taulukon arvot toteutuvat likimäärin.

Kuva B3: Helsingin kaupungin julkisten ulkovalaisimien himmennystaulukko [32].

C Kannattavuuslaskelmat

”Helsinki LED” -hankkeen sekä vaihtoehtoisten saneerausohjelmien I ja II taloudellista kannattavuutta tutkittiin nettonykyarvojen, sisäisten korkokantojen ja takaisinmaksuaikojen perusteella. Lisäksi liitteissä C1–C3 esitetään saneerausohjelmien investointikustannukset sekä saneerauksilla saavutettavat ensimmäisen vuoden hoitokustannussäästöt, energiasäästöt ja hiilidioksidipäästösäästöt. Kannattavuuslaskelmissa oletettiin, että kaikki yli 30-vuotiaat valaistusratkaisut ovat elinkaarensa päässä ja ne uusitaan kokonaan. Vastaavasti valaisimien vaihtojen oletettiin olevan suositeltavaa, mikäli valaisinpylväät, valaisinvarret, jalustat ja sähkönjakolaitteet ovat hyvässä kunnossa ja niiden jäljellä oleva tekninen elinikä on riittävä. Laskelmat perustuvat tämän työn elinkaarikustannuslaskennassa ratkaistuihin valaistuksen saneerauksesta aiheutuviin tiemetrikustannuksiin.

Liitteessä C1 esitetään ”Helsinki LED” -hankkeen kannattavuuslaskelma, jossa julkisen ulkovalaistusverkon kaikki purkauslamppuvalaisimet saneerataan LED-valaisimilla vuosina 2015–2016. Nähdään, että pääosa saneerauksista, noin 67 300, toteutetaan valaisimien vaihdoilla ja noin 13 600 täysin uudella valaistuksella perustuen ulkovalaistusverkon nykytilanteeseen. Lisäksi purkauslampuilla toteutetut noin 2 500 sillanalus- ja tunnelivalaisinta korvataan asennustavaltaan vastaavilla LED-valaistusratkaisuilla. Havaitaan, ettei hankkeen toteutettavuutta ja taloudellista kannattavuutta voida perustella nettonykyarvolla eikä takaisinmaksuajalla.

Liitteessä C2 esitetään vaihtoehtoisen saneerausohjelma I kannattavuuslaskelma, jossa julkisen ulkovalaistusverkon kaikki elohopealamppuvalaisimet saneerataan pääosin LED-valaisimilla vuosina 2015–2018. Pääkatujen valaisimien saneeraukset toteutetaan suurpainenatriumlamppuvalaisimilla tämän työn elinkaarikustannuslaskennan mukaisesti. Nähdään, että valtaosa saneerauksista, noin 5 050, toteutetaan täysin uudella valaistuksella ja noin 3 250 valaisimien vaihdoilla perustuen ulkovalaistusverkon nykytilanteeseen. Lisäksi elohopealampuilla toteutetut noin 1 700 sillanalus- ja tunnelivalaisinta korvataan asennustavaltaan vastaavilla LED-valaistusratkaisuilla. Havaitaan, ettei hankkeen toteutettavuutta ja taloudellista kannattavuutta voida perustella nettonykyarvolla eikä takaisinmaksuajalla.

Liitteessä C3 esitetään vaihtoehtoisen saneerausohjelman II kannattavuuslaskelma, jossa julkisen ulkovalaistusverkon kaikki elohopealamppuvalaisimet, korvaavat purkauslamppuvalaisimet sekä osa elinkaarensa päässä olevista suurpainenatriumlamppuvalaisimista saneerataan LED-valaisimilla vuosina 2015–2018. Huomataan, että enemmistö saneerauksista, noin 12 300, toteutetaan valaisimien vaihdoilla ja noin 10 400 täysin uudella valaistuksella perustuen ulkovalaistusverkon nykytilanteeseen. Lisäksi purkauslampuilla toteutetut noin 2 500 sillanalus- ja tunnelivalaisinta korvataan asennustavaltaan vastaavilla LED-valaistusratkaisuilla. Havaitaan, ettei hankkeen toteutettavuutta ja taloudellista kannattavuutta voida perustella nettonykyarvolla eikä takaisinmaksuajalla.

"Helsinki LED" -hanke						
	Valaisimia [kpl]	K_0 [€]	S_{v1} [€]	S_{p1} [€]	S_v [GWh]	S_{co2} [t]
Valaisimien vaihdot	67 300	37 869 790	2 307 730	155 832	21,0	4 553
Uudisrakentaminen	13 600	61 674 886	682 454	27 664	6,2	1 346
Sillanalus- ja tunnelivalaisimet	2 500	1 850 000	57 596	6 915	0,5	114
Yhteensä	83 400	101 394 676	3 047 780	190 412	27,7	6 012

Katupoikkeileikkausten ja saneerausten parametrit:

		Valaisimien vaihdot		Uudisrakentaminen	
	Osuudet	Valaisimia [kpl]	Matka [km]	Valaisimia [kpl]	Matka [km]
Pääkadut	16 %	10 768	215	2 176	46
Kokoajakadut	16 %	10 768	377	2 176	83
Tonttikadut	27 %	18 171	545	3 672	143
KLV:t, aukiot ja puistot	41 %	27 593	828	5 576	206
Yhteensä	100 %	67 300	1 965	13 600	478

		$K_{u1/V}$ [€]	K_{v1} [€]	K_{p1} [€]	Sähkönkulutus [GWh/a]
Valaisimien vaihdot	Nykytila	-	3 755 659	1 180 632	34,1
	Saneeraus	37 169 790	1 447 930	1 024 800	13,2
Uudisrakentaminen	Nykytila	-	1 003 924	238 582	9,1
	Saneeraus	60 974 886	321 470	210 918	2,9
Sillanalus- ja tunnelivalaisimet	Nykytila	-	125 796	43 857	1,1
	Saneeraus	1 850 000	68 200	36 942	0,6
Yhteensä	Nykytila	-	4 885 380	1 463 071	44,4
	Saneeraus	99 994 676	1 837 599	1 272 659	16,7

Laskennassa käytetyt parametrit:

p	6 %
θ_v	3 %
θ_{up}	3 %
J	25 %
Päästökertoimen [t/GWh]	217

Oletukset lisähenkilöstöstä:

	Henkilötyövuosia [a]	Kustannukset [€]
Lisähenkilöstö (2015-2016)	14	1 400 000

Oletukset sillanalus- ja tunnelivalaisimista:

	Valaisintyyppi	P_1 [kW/kpl]	Osuudet	H_v [€/kpl]	K_{p1} [€/kpl]
Sillanalueet	LED (80 W)	0,080	60 %	900	16
Tunnelit	LED (35 W)	0,035	40 %	500	13

Nimellisarvot						Diskonttaus			
						Nettonykyarvo (NPV)		Takaisinmaksuaika (N_d)	
Vuosi	k_v	k_{up}	Menot [€]	Tulot [€]	Kassavirta [€]	Diskontattu kassavirta [€]	Kum. Diskontattu kassavirta [€]	Diskonttatut säästöt [€]	Investointinista kattamatta [€]
2017	1,00	1,00	-101 394 676	3 238 192	-98 156 484	-98 156 484	-98 156 484	3 238 192	-98 156 484
2018	0,97	0,97		3 238 192	3 238 192	3 146 545	-95 009 938	3 146 545	-95 009 938
2019	0,94	0,94		3 238 192	3 238 192	3 057 492	-91 952 446	3 057 492	-91 952 446
2020	0,92	0,92		3 238 192	3 238 192	2 970 959	-88 981 487	2 970 959	-88 981 487
2021	0,89	0,89		3 238 192	3 238 192	2 886 876	-86 094 611	2 886 876	-86 094 611
2022	0,87	0,87		3 238 192	3 238 192	2 805 172	-83 289 439	2 805 172	-83 289 439
2023	0,84	0,84		3 238 192	3 238 192	2 725 780	-80 563 659	2 725 780	-80 563 659
2024	0,82	0,82		3 238 192	3 238 192	2 648 635	-77 915 024	2 648 635	-77 915 024
2025	0,79	0,79		3 238 192	3 238 192	2 573 674	-75 341 350	2 573 674	-75 341 350
2026	0,77	0,77		3 238 192	3 238 192	2 500 834	-72 840 516	2 500 834	-72 840 516
2027	0,75	0,75		3 238 192	3 238 192	2 430 056	-70 410 461	2 430 056	-70 410 461
2028	0,73	0,73		3 238 192	3 238 192	2 361 281	-68 049 180	2 361 281	-68 049 180
2029	0,71	0,71		3 238 192	3 238 192	2 294 452	-65 754 728	2 294 452	-65 754 728
2030	0,69	0,69		3 238 192	3 238 192	2 229 515	-63 525 214	2 229 515	-63 525 214
2031	0,67	0,67		3 238 192	3 238 192	2 166 415	-61 358 798	2 166 415	-61 358 798
2032	0,65	0,65		3 605 712	3 605 712	2 344 021	-59 014 778	2 105 101	-59 253 697
2033	0,63	0,63		3 605 712	3 605 712	2 277 681	-56 737 097	2 045 523	-57 208 174
2034	0,61	0,61		3 605 712	3 605 712	2 213 218	-54 523 879	1 987 631	-55 220 543
2035	0,60	0,60		3 605 712	3 605 712	2 150 580	-52 373 300	1 931 377	-53 289 166
2036	0,58	0,58		3 605 712	3 605 712	2 089 714	-50 283 585	1 876 716	-51 412 450
2037	0,56	0,56		3 605 712	3 605 712	2 030 571	-48 253 014	1 823 601	-49 588 849
2038	0,55	0,55		3 605 712	3 605 712	1 973 102	-46 279 912	1 771 990	-47 816 859
2039	0,53	0,53		3 605 712	3 605 712	1 917 260	-44 362 652	1 721 839	-46 095 020
2040	0,52	0,52		3 605 712	3 605 712	1 862 998	-42 499 654	1 673 108	-44 421 913
2041	0,50	0,50		3 605 712	3 605 712	1 810 271	-40 689 383	1 625 756	-42 796 157
2042	0,49	0,49		3 605 712	3 605 712	1 759 037	-38 930 345	1 579 744	-41 216 413
2043	0,47	0,47		3 605 712	3 605 712	1 709 253	-37 221 092	1 535 034	-39 681 379
2044	0,46	0,46		3 605 712	3 605 712	1 660 878	-35 560 214	1 491 590	-38 189 790
2045	0,45	0,45		3 605 712	3 605 712	1 613 872	-33 946 342	1 449 375	-36 740 415
2046	0,43	0,43	-24 998 669	3 605 712	-21 392 957	-3 045 476	-36 991 818	1 408 355	-35 332 060

Sisäinen korkokanta (IRR)

Korkokanta	Nettonykyarvo [€]
0 %	38 314 442
1 %	19 350 207
2 %	3 674 387
2,264 %	-
3 %	-9 344 202
4 %	-20 207 670
5 %	-29 316 653
6 %	-36 991 818

Kuva C1: "Helsinki LED" -hankkeen kannattavuuslaskelma.

Vaihtoehtoinen saneerausohjelma I						
	Valaisimia [kpl]	K_0 [€]	S_{01} [€]	S_{0p1} [€]	S_0 [GWh]	S_{CO2} [t]
Valaisimien vaihdot	3 250	1 620 125	178 927	9 801	1,6	353
Uudisrakentaminen	5 050	18 283 259	272 589	14 765	2,5	538
Sillanalus- ja tunnelivalaisimet	1 700	1 258 000	52 492	4 702	0,5	104
Yhteensä	10 000	21 161 384	504 008	29 269	4,6	994

Katupoikkileikkausten ja saneerausten parametrit:

	Valaisimien vaihdot			Uudisrakentaminen	
	Osuudet	Valaisimia [kpl]	Matka [km]	Valaisimia [kpl]	Matka [km]
Pääkadut	4 %	130	3	202	4
Kokoojakadut	20 %	650	23	1 010	38
Tonttikadut	33 %	1 073	32	1 667	65
KLV:t, aukiot ja puistot	43 %	1 398	42	2 172	80
Yhteensä	100 %	3 250	99	5 050	188

		K_{0UV} [€]	K_{01} [€]	K_{0p1} [€]	Sähkönkulutus [GWh/a]
Valaisimien vaihdot	Nykytila	-	244 003	57 014	2,2
	Saneeraus	1 620 125	65 076	47 213	0,6
Uudisrakentaminen	Nykytila	-	380 821	88 591	3,5
	Saneeraus	18 283 259	108 233	73 826	1,0
Sillanalus- ja tunnelivalaisimet	Nykytila	-	98 868	29 823	0,9
	Saneeraus	1 258 000	46 376	25 120	0,4
Yhteensä	Nykytila	-	723 692	175 428	6,6
	Saneeraus	21 161 384	219 685	146 159	2,0

Laskennassa käytetyt parametrit:

ρ	6 %
θ_{0p}	3 %
θ_{0p}	3 %
J	25 %
Päästökertoimen [t/GWh]	217

Oletukset lisähenkilöstöstä:

	Henkilötyövuosia [a]	Kustannukset [€]
Lisähenkilöstö	-	-

Oletukset sillanalus- ja tunnelivalaisimista:

	Valaisintyyppi	P_i [kW/kpl]	Osuudet	H_i [€/kpl]	K_{0p1} [€/kpl]
Sillanaluokset	LED (80 W)	0,080	60 %	900	16
Tunnelit	LED (35 W)	0,035	40 %	500	13

Vuosi	Nimellisarvot					Diskonttaus			
	k_0	k_{0p}	Menot [€]	Tulot [€]	Kassavirta [€]	Nettonykyarvo (NPV)		Takaisinmaksuaika (K_{0p})	
						Diskontattu kassavirta [€]	Kum. Diskontattu kassavirta [€]	Diskontatut säästöt [€]	Investoinnista kattamatta [€]
2019	1,00	1,00	- 21 161 384	533 277	- 20 628 107	- 20 628 107	- 20 628 107	533 277	- 20 628 107
2020	0,97	0,97		533 277	533 277	518 184	- 20 109 923	518 184	- 20 109 923
2021	0,94	0,94		533 277	533 277	503 519	- 19 606 404	503 519	- 19 606 404
2022	0,92	0,92		533 277	533 277	489 268	- 19 117 136	489 268	- 19 117 136
2023	0,89	0,89		533 277	533 277	475 421	- 18 641 715	475 421	- 18 641 715
2024	0,87	0,87		533 277	533 277	461 965	- 18 179 750	461 965	- 18 179 750
2025	0,84	0,84		533 277	533 277	448 891	- 17 730 859	448 891	- 17 730 859
2026	0,82	0,82		533 277	533 277	436 187	- 17 294 672	436 187	- 17 294 672
2027	0,79	0,79		533 277	533 277	423 842	- 16 870 831	423 842	- 16 870 831
2028	0,77	0,77		533 277	533 277	411 846	- 16 458 985	411 846	- 16 458 985
2029	0,75	0,75		533 277	533 277	400 190	- 16 058 794	400 190	- 16 058 794
2030	0,73	0,73		533 277	533 277	388 864	- 15 669 931	388 864	- 15 669 931
2031	0,71	0,71		533 277	533 277	377 858	- 15 292 072	377 858	- 15 292 072
2032	0,69	0,69		533 277	533 277	367 164	- 14 924 908	367 164	- 14 924 908
2033	0,67	0,67		533 277	533 277	356 773	- 14 568 135	356 773	- 14 568 135
2034	0,65	0,65		572 990	572 990	372 493	- 14 195 642	372 493	- 14 195 642
2035	0,63	0,63		572 990	572 990	361 950	- 13 833 692	361 950	- 13 833 692
2036	0,61	0,61		572 990	572 990	351 706	- 13 481 986	351 706	- 13 481 986
2037	0,60	0,60		572 990	572 990	341 753	- 13 140 233	341 753	- 13 140 233
2038	0,58	0,58		572 990	572 990	332 080	- 12 808 153	332 080	- 12 808 153
2039	0,56	0,56		572 990	572 990	322 682	- 12 485 471	322 682	- 12 485 471
2040	0,55	0,55		572 990	572 990	313 549	- 12 171 922	313 549	- 12 171 922
2041	0,53	0,53		572 990	572 990	304 675	- 11 867 246	304 675	- 11 867 246
2042	0,52	0,52		572 990	572 990	296 052	- 11 571 194	296 052	- 11 571 194
2043	0,50	0,50		572 990	572 990	287 674	- 11 283 521	287 674	- 11 283 521
2044	0,49	0,49		572 990	572 990	279 532	- 11 003 989	279 532	- 11 003 989
2045	0,47	0,47		572 990	572 990	271 621	- 10 732 368	271 621	- 10 732 368
2046	0,46	0,46		572 990	572 990	263 933	- 10 468 435	263 933	- 10 468 435
2047	0,45	0,45		572 990	572 990	256 463	- 10 211 972	256 463	- 10 211 972
2048	0,43	0,43	- 5 290 346	572 990	- 4 717 356	- 727 164	10 939 136	249 205	9 962 767

Sisäinen korkokanta (IRR)

Korkokanta	Nettonykyarvo [€]
0 %	69 895
0,024 %	-
1 %	- 2 638 300
2 %	- 4 906 287
3 %	- 6 812 315
4 %	- 8 420 109
5 %	- 9 781 595
6 %	- 10 939 136

Kuva C2: Vaihtoehtoisen saneerausohjelman I kannattavuuslaskelma.

Vaihtoehtoinen saneerausohjelma II						
	Valaisimia [kpl]	K_0 [€]	S_{01} [€]	S_{01} [€]	S_0 [GWh]	S_{002} [t]
Valaisimien vaihdot	12 300	6 740 900	448 469	38 662	4,1	885
Uudisrakentaminen	10 400	41 937 975	567 949	31 664	5,2	1 120
Sillanalus- ja tunnelivalaisimet	2 500	1 850 000	57 596	6 915	0,5	114
Yhteensä	25 200	50 528 875	1 074 014	77 241	9,8	2 119

Katupoikkileikkauksen ja saneerauksen parametrit:

	Osuudet	Valaisimien vaihdot		Uudisrakentaminen	
		Valaisimia [kpl]	Matka [km]	Valaisimia [kpl]	Matka [km]
Pääkadut	9 %	1 107	22	936	20
Kokoojakadut	11 %	1 353	47	1 144	43
Tonttikadut	15 %	1 845	55	1 560	61
KLV:t, aukiot ja puistot	65 %	7 995	240	6 760	250
Yhteensä	100 %	12 300	365	10 400	374

		K_{0UV} [€]	K_{01} [€]	K_{001} [€]	Sähkönkulutus [GWh/a]
Valaisimien vaihdot	Nykytila	-	654 999	215 777	6,0
	Saneeraus	5 940 900	206 530	177 115	1,9
Uudisrakentaminen	Nykytila	-	754 911	182 445	6,9
	Saneeraus	41 137 975	186 962	150 782	1,7
Sillanalus- ja tunnelivalaisimet	Nykytila	-	125 796	43 857	1,1
	Saneeraus	1 850 000	68 200	36 942	0,6
Yhteensä	Nykytila	-	1 535 706	442 079	14,0
	Saneeraus	48 928 875	461 692	364 838	4,2

Laskennassa käytetyt parametrit:

p	6 %
θ_e	3 %
θ_{0p}	3 %
J	25 %
Päästökerrin [t/GWh]	217

Oletukset lisähenkilöstöstä:

	Henkilötyövuosia [a]	Kustannukset [€]
Lisähenkilöstö (2015-2018)	16	1 600 000

Oletukset sillanalus- ja tunnelivalaisimista:

	Valaisintyyppi	P_i [kW/kpl]	Osuudet	H_v [€/kpl]	K_{001} [€/kpl]
Sillanalukset	LED (80 W)	0,080	60 %	900	16
Tunnelit	LED (35 W)	0,035	40 %	500	13

Vuosi	k_e	k_{0p}	Nimellisarvot			Diskonttaus			
			Menot [€]	Tulot [€]	Kassavirta [€]	Nettonykyarvo (NPV)		Takaisinmaksuaika (N_d)	
						Diskontattu kassavirta [€]	Kum. Diskontattu kassavirta [€]	Diskontatut säästöt [€]	Investointien kattamatta [€]
2019	1,00	1,00	-50 528 875	1 151 255	-49 377 620	-49 377 620	-49 377 620	1 151 255	-49 377 620
2020	0,97	0,97		1 151 255	1 151 255	1 118 672	-48 258 947	1 118 672	-48 258 947
2021	0,94	0,94		1 151 255	1 151 255	1 087 012	-47 171 935	1 087 012	-47 171 935
2022	0,92	0,92		1 151 255	1 151 255	1 056 247	-46 115 688	1 056 247	-46 115 688
2023	0,89	0,89		1 151 255	1 151 255	1 026 354	-45 089 334	1 026 354	-45 089 334
2024	0,87	0,87		1 151 255	1 151 255	997 306	-44 092 029	997 306	-44 092 029
2025	0,84	0,84		1 151 255	1 151 255	969 080	-43 122 948	969 080	-43 122 948
2026	0,82	0,82		1 151 255	1 151 255	941 653	-42 181 295	941 653	-42 181 295
2027	0,79	0,79		1 151 255	1 151 255	915 003	-41 266 292	915 003	-41 266 292
2028	0,77	0,77		1 151 255	1 151 255	889 107	-40 377 186	889 107	-40 377 186
2029	0,75	0,75		1 151 255	1 151 255	863 943	-39 513 243	863 943	-39 513 243
2030	0,73	0,73		1 151 255	1 151 255	839 492	-38 673 751	839 492	-38 673 751
2031	0,71	0,71		1 151 255	1 151 255	815 733	-37 858 018	815 733	-37 858 018
2032	0,69	0,69		1 151 255	1 151 255	792 646	-37 065 372	792 646	-37 065 372
2033	0,67	0,67		1 151 255	1 151 255	770 213	-36 295 159	770 213	-36 295 159
2034	0,65	0,65		1 243 593	1 243 593	808 442	-35 486 718	748 414	-35 546 745
2035	0,63	0,63		1 243 593	1 243 593	785 562	-34 701 156	727 233	-34 819 513
2036	0,61	0,61		1 243 593	1 243 593	763 329	-33 937 827	706 651	-34 112 862
2037	0,60	0,60		1 243 593	1 243 593	741 725	-33 196 102	686 651	-33 426 211
2038	0,58	0,58		1 243 593	1 243 593	720 733	-32 475 370	667 217	-32 758 994
2039	0,56	0,56		1 243 593	1 243 593	700 335	-31 775 035	648 334	-32 110 660
2040	0,55	0,55		1 243 593	1 243 593	680 514	-31 094 521	629 985	-31 480 675
2041	0,53	0,53		1 243 593	1 243 593	661 254	-30 433 267	612 155	-30 868 520
2042	0,52	0,52		1 243 593	1 243 593	642 539	-29 790 728	594 830	-30 273 690
2043	0,50	0,50		1 243 593	1 243 593	624 354	-29 166 373	577 995	-29 695 695
2044	0,49	0,49		1 243 593	1 243 593	606 684	-28 559 690	561 637	-29 134 058
2045	0,47	0,47		1 243 593	1 243 593	589 514	-27 970 176	545 741	-28 588 317
2046	0,46	0,46		1 243 593	1 243 593	572 829	-27 397 347	530 296	-28 058 021
2047	0,45	0,45		1 243 593	1 243 593	556 617	-26 840 730	515 288	-27 542 733
2048	0,43	0,43	-12 232 219	1 243 593	-10 988 625	-1 716 675	-28 557 404	500 704	-27 042 029

Sisäinen korkokanta (IRR)	
Korkokanta	Nettonykyarvo [€]
0 %	-5 314 010
1 %	-10 995 521
2 %	-15 770 798
3 %	-19 796 844
4 %	-23 202 576
5 %	-26 093 807
6 %	-28 557 404

Kuva C3: Vaihtoehtoisen saneerausohjelman II kannattavuuslaskelma.